

Forschungsbericht 2020-32

Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte

Florian Kleiner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

D 93



Herausgeber

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Bibliotheks- und
Informationswesen
D-51170 Köln
Porz-Wahnheide
Linder Höhe
D-51147 Köln

Telefon

(0 22 03) 6 01 - 44 44

Telefax

(0 22 03) 6 01 - 47 47

Als Manuskript gedruckt.
Abdruck oder sonstige Verwendung
nur nach Absprache mit dem DLR gestattet.

ISSN 1434-8454

Forschungsbericht 2020-32

Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft

Systemische Technologiebewertung
konkurrierender Antriebskonzepte

Florian Kleiner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart

238 Seiten
63 Bilder
96 Tabellen
210 Literaturstellen



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft

Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Florian Kleiner, M.Sc.

Zell am Harmersbach

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Tag der mündlichen Prüfung:	27.05.2020

Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart

Angefertigt am Institut für Fahrzeugkonzepte,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V. Stuttgart

2020

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Zeitraum von 2012 bis 2018. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit in besonderem Maße beigetragen haben.

An erster Stelle gilt hierbei der Dank Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich, für die Übernahme des Hauptreferats sowie die gewährte Unterstützung und Förderung. Großer Dank gebührt ebenso Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, für die Übernahme des Koreferats, sowie meinem Betreuer Dr. Stephan Schmid, für seine fortwährende Unterstützung. Eine große Dankbarkeit gebührt darüber hinaus meinen ehemaligen Kollegen Jens Brokate, Danny Calliari und Tobias Ruck, für ihr Engagement während der gesamten Arbeit sowie für die vielen konstruktiven Diskussionen und Anregungen. Ein Dankeschön geht auch an die ehemaligen studentischen Mitarbeiter Michael Hillebrand, Timo Lemmke, Florian Blaser, Aleksandar Eric, Christoph Alber und Jan Dewenter, für ihre Beiträge und ihre vielfältige Unterstützung.

Stuttgart, im Juni 2020

Florian Kleiner

Kurzfassung

Die Arbeit vollzieht eine systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte bei Nutzfahrzeugen hinsichtlich des deutschen Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes und liefert einen wissenschaftlichen Beitrag zur Diskussion der Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte sowie der damit einhergehenden CO₂-Emissionsreduktionspotentialen. Übergeordnetes Ziel ist die Durchführung umfassender Szenarioanalysen, um fundierte Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung und der Industrie abzuleiten. Insbesondere unter den Prämissen einer wirksamen CO₂-Regulierungsstrategie und der Nutzung von Synergieeffekten, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen. Die systemische Technologiebewertung von Nutzfahrzeugkonzepten folgt dem „*bottom-up*“-Prinzip. Diese zeichnet sich durch eine ganzheitliche und konsequent transportaufgabenspezifische Betrachtung, eine detaillierte Abbildung des antriebstechnologischen sowie ökonomischen Kontextes, der Berücksichtigung von CO₂-Regulierungsstrategien und potentiellen Synergieeffekten, ausgehend vom Markt für Personenkraftwagen, aus.

Die Szenarioanalysen verdeutlichen, dass der Markteintritt alternativer Antriebskonzepte und die Elektrifizierungsintensität in hohem Maße in Abhängigkeit der CO₂-Regulierungsstrategie bestimmt werden. Synergieeffekte stärken die Wettbewerbsfähigkeit elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte und beschleunigen den Markteintritt sowie die Marktdiffusion von brennstoffzellen- bzw. batterieelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugkonzepten. Eine ambitionierte CO₂-Regulierungsstrategie bewirkt in hohem Maße eine Reduktion der Well-to-Wheel CO₂-Emissionen, des Energieverbrauchs und der Erdölabhängigkeit des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes. In Kombination mit der Nutzung von Synergieeffekten wird eine optimale Kosten-Nutzen-Relation im Sinne von Mehrkosten je eingesparter Tonne CO₂ erreicht.

Abstract

The progressive flexibilization of logistics and the associated implementation of modern logistics concepts are resulting in an increasing number of small volume and fragmented goods transport. This circumstance is one of the reasons for a rising delivery volume for road freight transport and results in an increase in energy consumption and CO₂ emissions. Transport services are almost exclusively performed by diesel fueled commercial vehicles, which is not compatible with the national target to lower transport related greenhouse gas emissions. Against this background, one of the central future challenges in road freight transport is to reduce vehicle related CO₂ emissions at economically acceptable conditions for fleet operator, despite an expected increasing freight transport performance. The role and contribution of alternative powertrain technologies is still uncertain. The introduction of CO₂ fleet emission targets in the European Union increases the pressure on commercial vehicle manufacturers in particular to focus not only on incremental individual measures to further minimize the fuel consumption of conventional commercial vehicle concepts but also on the market introduction of alternative powertrain technologies. Limited development budgets and fierce competition require targeted investments. Therefore, research into the implications for the technology portfolio of commercial vehicle manufacturers based on different CO₂ regulation strategies is essential. In addition, the effect on CO₂ emissions and energy consumption is another important aspect to be investigated further.

The aim of this study is, therefore, to carry out comprehensive scenario analyses of the market diffusion of competing powertrain technologies with regard to commercial vehicles registrations in Germany. On this basis well-founded recommendations for the future evolution of alternative powertrain concepts and the associated reduction of CO₂ emissions and energy consumption are derived.

The scientific discourse on how to meet the challenge described above is limited to the identification of potentials for reducing fuel consumption of individual technologies or technology packages and total cost of ownership analyses. Studies on the market diffusion of competing powertrain technologies for heavy commercial vehicles exist sporadically, but they are subject to strong powertrain technology and economic restrictions. In general, there is no holistic and systemic view of the market for heavy commercial road transport vehicle registration. Similarly, analyses of the implications for the technology portfolio of commercial vehicle manufacturers with regard to an effective CO₂ legislation and the possible use of technological synergy effects regarding battery and fuel cell technology from the passenger car market are not known. This research gap is being addressed with a model approach for the holistic and systemic technology assessment of competing powertrain concepts for commercial vehicles in goods road transport and resulting comprehensive scenario analysis.

To meet the formulated objective, the first step was the characterization of the observation system as well as the description of the vehicle technical starting point. The system of observation is the market of commercial road freight vehicle registration in Germany. In general, and as in any market, supply is matched by demand. Both, supply and demand are influenced by different framework conditions. On the basis of individual purchase decision processes, different vehicle concepts enter the market. Transferred to the road haulage vehicle registration market, fleet operators demand commercial vehicle concepts. The commercial vehicles taken into account are split into six vehicle segments depending on their gross vehicle weight (GVW), ranging from 3.5 t GVW to 40 t GVW. Thus, vehicles related to the European classification scheme called N1, N2 and N3, are covered which take the form of transporter, multi-purpose trucks and tractor-trailers. Only configurations with two or three axles are considered. This excludes commercial vehicles that are used for passenger transport, in agricultural or forestry traffic or for other purposes such as fire-fighting vehicles or construction site traffic. The description of the vehicle technical starting point is based on product data sheets and various literature references. Key powertrain com-

ponent specific, gravimetric and volumetric performance characteristics as well as efficiencies and service life values are given in order to determine vehicle segment and powertrain technology specific the impact on payload and usable volume. Furthermore, the cross-sectional area, empty mass, air and rolling resistance coefficient per vehicle segment are defined in order to determine vehicle segment, powertrain technology and transport task specific the vehicles basic energy consumption.

In a second step, a holistic and systemically consistent techno-economic evaluation model for commercial vehicle concepts is developed, to ensure a comparative, transparent and consequent transport task specific evaluation of competing powertrain concepts. Three different transport tasks named urban goods transport, regional goods transport and long-distance goods transport are considered. In contrast to existing analyses, the influence of alternative powertrain concepts on payload and usable volume is taken into account. The procedure allows a comprehensive and systemic analysis of the cost structures of the vehicle segments, relevant for the German commercial vehicle registration market, and competing powertrain concepts. In the sense of a holistic approach, upstream and downstream stages or process steps are integrated into the analysis and interactions as well as dependencies of the influencing variables are taken into account. For the first time, a quantitative determination of specific maintenance costs and an estimation of residual values for commercial vehicle concepts with alternative powertrain technologies are carried out.

A fleet operator has several alternatives to choose from in order to further optimize the energy consumption of his vehicle. However, market transparency is impaired and results in potential buyers not being able to benchmark the performance of different vehicle concepts or to assess the transport task specific potential of individual add-on technologies. To structure this complex evaluation of technology elements in order to facilitate a rational assessment by the buyer, a utility based analysis is carried out by using the "House of Technology" methodology. The focus is on add-on individual

and system technologies classified by different categories: powertrain, aerodynamics, lightweight construction, tires and wheels and others.

Finally, a model approach for the holistic and systemic technology assessment of competing powertrain concepts for commercial vehicles is developed and applied. It maps the supply, demand as well as external factors on the market for newly registered commercial vehicles and combines the information and methodological approaches of the above mentioned work packages in a model based simulation. The modeling is done according to the "bottom-up" principle and by means of agent-based modeling. The modeling is particularly characterized by the following points:

- Comprehensive and transport task specific consideration of the commercial vehicle registration market. Main vehicle segments and transport tasks are addressed.
- Consistent and transparent evaluation of different powertrain technologies and the economic context including vehicle simulation and technology data.
- Simulation of market potentials, taking into account CO₂ fleet emission targets and technological synergy effects for battery and fuel cell technology, based on powertrain technology developments on the passenger car market.
- Use of novel empirical data on annual mileage (transport task and vehicle segment specific frequency distribution).

Within the framework of three different scenarios, the market diffusion of alternative powertrain concepts from 2015 to 2040 regarding commercial vehicle registrations in Germany are analyzed and the market implications in terms of the powertrain portfolio, CO₂ fleet emissions and energy consumption are shown. In addition, the influence of possible synergy effects with regard to battery and fuel cell technology based on the alternative powertrain market development for passenger cars is analyzed. Model based simulations always require an abstraction of the real system. Important model boundaries to mention are, that the maximum considered daily mileage is 720 km.

Evaluation is done based on a Tank-to-Wheel perspective. One-shift operation per day is assumed for all vehicles as well as that battery electric vehicles have the opportunity to charge overnight at the depot. Payload requirements are based on statistical data and vary according to the vehicle segment. This means that the same payload requirements apply to all powertrain concepts of a vehicle segment.

The results are shown on different levels. First, on the total market level, that corresponds to 628 individual purchase decisions. Second, differentiated by vehicle segments into light commercial vehicle (one segment: 3.5 t GVW) and heavy commercial vehicles (five segments: 7.5 t GVW, 12 t GVW, 18 t GVW, 26 t GVW and 40 t GVW). The three scenarios analyzed are differentiated as follows: A reference scenario named "Moderate Trendentwicklung", a positive extreme scenario named "geregelter Ruck" and a negative extreme scenario named "freies Spiel". The scenarios were developed in close alignment with the DLR scenarios in the "Verkehrsentwicklung und Umwelt (VEU)" project. The starting point is the reference scenario "moderate Trendentwicklung". Characteristic for this scenario is a moderate development of the trends observed today without comprehensive impulses from the government, regarding the technology development or from the buyers of commercial vehicles. The positive extreme scenario "geregelter Ruck" is characterized by comprehensive political measures and moderate impulses based on the demand side as well as in terms of technology developments, to achieve a significant reduction in CO₂ fleet emissions. In addition, and in contrast to the other scenarios, synergy effects regarding battery- and fuel cell technology from a passenger car market scenario are taken into account. The negative extreme scenario "freies Spiel" is characterized by the fact, that there are no impulses from the government, from the demand side or in terms of technology development, to promote a reduction in CO₂ fleet emissions.

The results of the reference scenario „moderate Trendentwicklung“ show, that hybrid electric vehicle concepts, especially mild hybrid electric vehicles and full hybrid electric vehicles, play an essential role in achieving given fleet CO₂ emission targets in

2025 (-15 %) and 2030 (-30 %). As the target values become more stringent (-40 % until 2040), increasing demand for the vehicle concepts goes hand in hand with a higher degree of electrification. However, plug-in hybrid electric vehicle concepts represent a bridging technology and will be displaced by the market entry of fuel cell vehicles after 2035. A significant experience curve effect of the fuel cell system, compared to the moderate experience curve effects of the battery system, as well as the advantageous hydrogen price enables the economic efficiency of fuel cell vehicles compared to plug-in hybrid and battery electric vehicle concepts. This applies to both, light commercial vehicles and heavy commercial vehicles. Overall, it can be seen that diesel fuel driven vehicle concepts continue to dominate the road haulage vehicle registration market. Over the years, the market share will decline from 99 % in 2015 to 67 % in 2040. In 2040, the reduction potential reached regarding Well-to-Wheel (WtW) CO₂ emissions and energy consumption is -46 % and -30 % compared to the 2015 baseline. Considered over the time frame 2015-2040, the additional acquisition costs per Well-to-Wheel CO₂ emission saved amount to 3,260 EUR₂₀₁₀/ton WtW-CO₂ in average.

Through increasing energy taxes and the abolition of the fuel tax preferential treatment of diesel fuel over time, more favorable electricity prices compared to the reference scenario, the use of synergy effects as well as ambitious fleet targets in 2025 (-40 %) and 2030 (-80 %), a highly electrified fleet can be expected from the year 2030 onwards with a further increase in electrification. The scenario results of the positive extreme scenario "geregelter Ruck" show high market potentials for both battery electric and fuel cell electric powertrain technologies. However, the market penetration of battery electric and fuel cell electric vehicles is surprising in terms of vehicle segments. Under the given framework conditions, the light commercial vehicle market is dominated by fuel cell electric vehicle concepts from 2030 onwards, whereas battery electric vehicle concepts cannot compete. This is due to the cost structure, whereby the investment costs are more decisive with regard to light commercial vehicles. Higher initial costs of battery electric vehicle concepts e.g. for the

required charging infrastructure, cannot be compensated by lower operating costs (yearly mileages are not high enough). In contrast, battery electric vehicle concepts achieve high market shares in the heavy commercial vehicle market. This is due to the cost structure of heavy commercial vehicles, where operating costs predominate. Initial cost disadvantages can be offset by cost advantages over operating costs, due to the significantly higher annual mileages of heavy commercial vehicles compared to light commercial vehicles. In addition, it should be noted, that underlying payload requirements are manageable and in most of the cases electric driving range is sufficient to perform the required daily mileage (also to a large extent in national long-distance transport). Overall, the results show that diesel-powered vehicle concepts are losing the market dominance. Over the years, the market share will decline from 99 % in 2015 to 20 % in 2040 considering the total market (LNF & SNF). In 2040, the reduction potential reached regarding Well-to-Wheel CO₂ emissions and energy consumption is -86 % and -56 % compared to the 2015 baseline. Considered over the time frame 2015-2040, the additional acquisition costs per Well-to-Wheel CO₂ emission saved amount to 1,314 EUR₂₀₁₀/ton WtW-CO₂ in average.

In case of no incentives for alternative powertrain technologies and no further tightening or introduction of fleet CO₂ fleet emission targets, the dominance of the conventional powertrain continues. The results of the extreme negative scenario "freies Spiel" show no market penetration of battery or fuel cell electric vehicle concepts. The market consists exclusively of powertrain concepts with an internal combustion engine, whereof the market share of diesel varies between 92 % and 99 % over the years. The gap is served by natural gas powered vehicles. Mild hybrid electric vehicle concepts play a key role in achieving already adopted CO₂ fleet emission targets for light commercial vehicles. With regard to heavy commercial vehicles, hybrid powertrain concepts remain in niche applications, as do vehicle concepts powered by natural gas. In 2040, the total market (LNF & SNF) reduction potential reached regarding Well-to-Wheel CO₂ emissions and energy consumption is -18 % and -14 % compared to the 2015 baseline. Considered over the time frame 2015-2040, the additional ac-

quisition costs per Well-to-Wheel CO₂ emission saved amount to 2,062 EUR₂₀₁₀/ton WtW-CO₂ in average.

Summing up, the market entry of alternative powertrain concepts and the intensity of electrification are highly influenced by the underlying CO₂ emission legislation. An early and accelerated market diffusion of locally emission free vehicle concepts will only be achieved through ambitious and diverse measures of all stakeholders involved. Specifically, through ambitious CO₂ fleet emission targets (e.g. cross segmental reduction of the CO₂ fleet emissions by 40 % in 2030 and 80 % in 2040 compared to 2019), further comprehensive political measures (e.g. increase in energy taxes on fossil fuels and abolition of the preferential tax treatment of diesel fuel), moderate impulses from the demand side (acceptance of longer payback periods) and the use of synergy effects regarding battery and fuel cell technology. As a result, the average additional acquisition costs per Well-to-Wheel CO₂ emission saved are the lowest and CO₂ emissions as well as the energy consumption of the vehicle market are significantly reduced. Possible synergy effects regarding fuel cell and battery technology from the passenger car market can contribute significantly to strengthening the competitiveness of electrified commercial vehicle concepts. The influence is largely determined by the level of the synergy effects and the underlying CO₂ emission targets.

Within the scope of this work, a model approach for the systemic technology assessment of competing powertrain technologies for commercial vehicles was developed and applied to the vehicle registrations of on-road freight transport in Germany. Three different scenarios up to the year 2040 are carried out and analyzed. This work is characterized in particular by a holistic and consistent transport task-specific consideration, high level of detail and the consideration of powertrain specific maintenance costs, residual values, future technology options, CO₂ fleet emission targets as well as synergy effects regarding battery and fuel cell technology. Furthermore, the implementation of a frequency distribution of transport task and vehicle segment specific annual mileage clusters is unique. The special features mentioned promote a

comprehensive understanding of the market for new road haulage vehicles, in particular of the socio-technical scope for the market diffusion of alternative powertrain technologies. In addition, the work makes a quantitative and qualitative contribution to showing the consequences of different decision alternatives. However, and it is important to mention, that the results always depend on model boundaries, relevance decisions implemented and the quality of data used.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	xix
Abbildungsverzeichnis	xxi
Abkürzungsverzeichnis.....	xxv
Symbolverzeichnis	xxix
1 Einführung.....	1
1.1 Stand des Wissens	3
1.2 Zielsetzung und adressierte Forschungsfragen.....	8
1.3 Methodisches Vorgehen.....	9
2 Charakteristika des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes	11
2.1 Identifikation und Beschreibung relevanter Fahrzeugsegmente	11
2.2 Organisationales Adoptionsverhalten	17
3 Beschreibung und Stand der Nutzfahrzeugtechnik	20
3.1 Antriebsstrang	20
3.1.1 Konventionelle Antriebsstrangkonzpte	20
3.1.2 Elektrifizierte Antriebsstrangkonzpte	25
3.2 Aerodynamik.....	35
3.3 Fahrzeugmasse.....	37
3.4 Reifen und Räder	39
3.5 Erläuterung der Anwendungszusammenhänge	40
4 Entwicklung eines techno-ökonomischen Bewertungsmodells für Nutzfahrzeugkonzepte	42
4.1 Definition der Transportaufgabe	43
4.2 Konfiguration des Nutzfahrzeugkonzeptes	44
4.3 Ermittlung des Energieverbrauchs	46
4.4 Ermittlung der relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung.....	49
4.4.1 Ermittlung von Instandhaltungskosten.....	60
4.4.2 Abschätzung von Restwerten.....	64
5 Nutzwertanalyse zukünftiger Technologieelemente mithilfe der Methode des „House of Technology“	69
5.1 Erstellung eines Funktionsmodells.....	71
5.2 Spezifikation und Charakterisierung des Technologieportfolios	71

5.3	Anwendungsspezifische Ermittlung des Potentials zur Reduktion des Streckenverbrauchs betrachteter Technologieelemente	75
5.4	Vorgehensweise zur Ermittlung der Nutzwerte von Technologieelementen des Technologieportfolios	78
6	Entwicklung eines Szenariomodells für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland	80
6.1	Modellierungsansatz und Umsetzung	80
6.1.1	Modellierung des Angebots	82
6.1.2	Modellierung der Nachfrage	83
6.1.3	Betrachtung externer Einflussfaktoren	91
6.1.4	Orientierung an CO ₂ -Flottenzielwerten	93
6.2	Festlegung der Basisparameter	94
6.3	Verifikation und Validierung	105
7	Szenarioanalysen bis zum Jahr 2040.....	118
7.1	Referenzszenario „moderate Trendentwicklungen“	119
7.1.1	Szenariobeschreibung.....	119
7.1.2	Szenarioergebnisse	122
7.2	Alternativszenario „geregelter Ruck“	137
7.2.1	Szenariobeschreibung.....	137
7.2.2	Szenarioergebnisse	138
7.3	Alternativszenario „freies Spiel“	145
7.3.1	Szenariobeschreibung.....	145
7.3.2	Szenarioergebnisse	146
7.4	Einordnung der Simulationsergebnisse in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten	151
8	Zusammenfassung und Ausblick	154
8.1	Wissenschaftlicher Mehrwert	155
8.2	Zentrale Ergebnisse der Szenarioanalysen.....	156
8.3	Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung und der Industrie	161
8.4	Limitationen und weiterer Forschungsbedarf.....	164
	Literaturverzeichnis	167

Anhang	183
A. Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Fahrzeugklassen.....	183
B. Relevante technische Daten und Kennwerte.....	185
C. Inflationsraten und Wechselkurse	198
D. Wartungsmaßnahmen und berücksichtigte Komponenten bzgl. der Instandsetzung	199
E. Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten von Einzeltechnologien und Maßnahmen zur Reduktion des Streckenverbrauchs	203
F. Technologieportfolio je Fahrzeugsegment.....	208
G. Streckenverbrauchsreduktionspotentiale des Technologieportfolios je Fahrzeugsegment.....	226
H. Übersicht der Fahrzeugcharakteristika je Fahrzeugsegment	230
I. Übersicht verschiedener Szenarioergebnisse.....	236

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	<i>Begriffsbestimmung der Fahrzeugklassen von Nutzkraftwagen und Anhängerfahrzeugen</i>	12
Tabelle 2.2:	<i>Relevante und betrachtete Nutzfahrzeugkonzepte.....</i>	15
Tabelle 2.3:	<i>Bandbreiten der Querschnittsfläche, Luftwiderstands- und Rollwiderstandsbeiwerte von Nutzfahrzeugkonzepten.....</i>	16
Tabelle 2.4:	<i>Bandbreiten antriebsstrangrelevanter Parameter von Nutzfahrzeugkonzepten.....</i>	16
Tabelle 3.1:	<i>Attribute der Dieselmotoren</i>	22
Tabelle 3.2:	<i>Attribute der Erdgasmotoren.....</i>	23
Tabelle 3.3:	<i>Attribute von Lithium-Ionen Batteriesystemen</i>	29
Tabelle 3.4:	<i>Attribute von Inverter und Gleichspannungswandler</i>	31
Tabelle 3.5:	<i>Attribute von Asynchron- und permanenterregten Synchronmaschinen</i>	32
Tabelle 3.6:	<i>Attribute von NT-PEM Systemen</i>	35
Tabelle 3.7:	<i>Stand der Technik aerodynamischer Maßnahmen für Fahrzeuge der Klasse N₂ und N₃.....</i>	36
Tabelle 3.8:	<i>Aerodynamische Attribute der Basisfahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten</i>	36
Tabelle 3.9:	<i>Fahrzeugsegmentspezifische Leermassen.....</i>	37
Tabelle 3.10:	<i>Fahrzeugsegmentspezifische Gewichtsbilanz</i>	38
Tabelle 3.11:	<i>Fahrzeugsegmentspezifische Massen der Basisfahrzeuge in kg</i>	39
Tabelle 3.12:	<i>Rollwiderstandsbeiwerte der Basisfahrzeuge</i>	40
Tabelle 4.1:	<i>Definition sowie beispielhafte Merkmale von Transportaufgaben</i>	44
Tabelle 4.2:	<i>Herstellkosten der Basisfahrzeuge und Investitionskosten des Sattelauflegers</i>	54
Tabelle 4.3:	<i>Spezifische Komponentenkosten pro Einheit der Kosteneinflussgröße</i>	55
Tabelle 4.4:	<i>Erfahrungskurvenparameter für die Berechnung der spezifischen Komponentenkosten.....</i>	56
Tabelle 4.5:	<i>Kostenübersicht der Ladeinfrastruktur je Leistungsklasse und Lademodi</i>	59

Tabelle 5.1:	<i>Bandbreiten der anwendungsspezifischen Reduktionspotentiale der betrachteten fahrzeugsegment- und antriebsstrangkzeptübergreifenden Technologieelementen</i>	77
Tabelle 6.1:	<i>Basisparameter des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes</i>	94
Tabelle 6.2:	<i>Transportaufgabenspezifische Streckenanteile</i>	95
Tabelle 6.3:	<i>Gravimetrische und volumetrische Auslastung</i>	95
Tabelle 6.4:	<i>Segmentspezifische Fahrzeugparameter</i>	96
Tabelle 6.5:	<i>Basismassen und nutzbare Ladevolumina</i>	96
Tabelle 6.6:	<i>Linguistische Terme der Fuzzy-Variablen Infrastrukturdichte und Reifegrad der Technologie je Antriebskonzept</i>	101
Tabelle 6.7:	<i>Abgeleitete mittlere Jahresfahrleistungen</i>	105
Tabelle 6.8:	<i>Durchgeführte Sensitivitätsanalysen inkl. der jeweiligen Parametervariation</i>	111
Tabelle 7.1:	<i>Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“</i>	122
Tabelle 7.2:	<i>Reduktion der CO₂-Flottenemissionen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten</i>	130
Tabelle 7.3:	<i>Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Alternativszenario „geregelter Ruck“</i>	138
Tabelle 7.4:	<i>Reduktion der CO₂-Flottenemissionen im Alternativszenario „geregelter Ruck“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten</i>	144
Tabelle 7.5:	<i>Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Alternativszenario „freies Spiel“</i>	146
Tabelle 7.6:	<i>Reduktion der CO₂-Flottenemissionen im Alternativszenario „freies Spiel“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten</i>	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	<i>Wissenschaftliche Einordnung der Arbeit</i>	<i>3</i>
Abbildung 1.2:	<i>Konzeptioneller Aufbau der Arbeit.....</i>	<i>10</i>
Abbildung 2.1:	<i>Im Straßengüterverkehr zu unterscheidende Fahrzeugsegmente inklusive der Anteile an den jährlichen Neuzulassungen (Mittelwerte hinsichtlich des Zeitraums von 2005 bis 2014)</i>	<i>13</i>
Abbildung 2.2:	<i>Tatsächliche Beförderungsleistung im Jahr 2014 – Gesamtverkehr und gewerblicher Verkehr</i>	<i>14</i>
Abbildung 2.3:	<i>Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs.....</i>	<i>17</i>
Abbildung 2.4:	<i>Wichtigkeit von Kaufkriterien hinsichtlich organisationalem Adoptionsverhalten</i>	<i>18</i>
Abbildung 2.5:	<i>Akzeptable Amortisationsdauern für Nutzfahrzeugbetreiber</i>	<i>19</i>
Abbildung 4.1:	<i>Schematische Darstellung der techno-ökonomischen Evaluation von Nutzfahrzeugkonzepten</i>	<i>43</i>
Abbildung 4.2:	<i>Berechnungsschema zur Ermittlung des Streckenverbrauchs am Beispiel konventionell betriebener Antriebsstrangkonzepte</i>	<i>47</i>
Abbildung 4.3:	<i>World Harmonized Light-Duty vehicles Test Procedure (WLTP).....</i>	<i>48</i>
Abbildung 4.4:	<i>World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)</i>	<i>49</i>
Abbildung 4.5:	<i>Präferenzrelationen bei Anschaffungspreis und TCO orientierter Entscheidungsgrundlage</i>	<i>51</i>
Abbildung 4.6:	<i>Bestandteile der relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung</i>	<i>52</i>
Abbildung 4.7:	<i>Wertverlustverlauf konventioneller Fahrzeugkonzepte in Prozent (relativ zum Anschaffungspreis) über die Laufleistung für verschiedene Fahrzeugsegmente</i>	<i>66</i>
Abbildung 5.1:	<i>Aufbau des „House of Technology“</i>	<i>70</i>
Abbildung 5.2:	<i>Funktionsmodell zur Reduktion des Streckenverbrauchs am Beispiel konventionell betriebener Antriebsstrangkonzepte</i>	<i>71</i>
Abbildung 5.3:	<i>Relationsmatrix zur Ermittlung des Gewichtungsfaktors.....</i>	<i>78</i>
Abbildung 6.1:	<i>Struktur des Szenariomodells</i>	<i>81</i>
Abbildung 6.2:	<i>Charakterisierung der Käufer-Agenten anhand vier Kategorien</i>	<i>84</i>

Abbildung 6.3:	<i>Schematische Darstellung der Kundentypen, ihrer Anteile und ihrer zulässigen Amortisationsdauer.....</i>	85
Abbildung 6.4:	<i>Prozess der Präferenzbildung und Kaufentscheidung</i>	89
Abbildung 6.5:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 3,5 t zGG.....</i>	98
Abbildung 6.6:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 7,5 t zGG.....</i>	98
Abbildung 6.7:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 12 t zGG.....</i>	99
Abbildung 6.8:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 18 t zGG.....</i>	99
Abbildung 6.9:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 26 t zGG.....</i>	99
Abbildung 6.10:	<i>Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 40 t zGG.....</i>	100
Abbildung 6.11:	<i>Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Nahbereich</i>	102
Abbildung 6.12:	<i>Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Regionalbereich.....</i>	103
Abbildung 6.13:	<i>Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Fernbereich</i>	104
Abbildung 6.14:	<i>Vergleich der ermittelten Neupreise für die Referenzfahrzeuge mit den Listenpreisen der Hersteller</i>	107
Abbildung 6.15:	<i>Vergleich der ermittelten Instandhaltungskosten für die Referenzfahrzeuge mit Angaben aus der Praxis.....</i>	108
Abbildung 6.16:	<i>Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 1: BAT_HE_ -10%.....</i>	112
Abbildung 6.17:	<i>Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 5: CO₂-Flottenzielwert_ -10%</i>	113
Abbildung 6.18:	<i>Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 6: CO₂-Flottenzielwert_ +10%.....</i>	114
Abbildung 6.19:	<i>Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 9: Diesel_ -10%</i>	115
Abbildung 6.20:	<i>Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 15: Amortisationsdauer +1 Jahr</i>	116

Abbildung 7.1:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	124
Abbildung 7.2:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	126
Abbildung 7.3:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	128
Abbildung 7.4:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	129
Abbildung 7.5:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Veränderung der Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte durch Synergieeffekte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	131
Abbildung 7.6:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) – Kostenreduktionsverläufe der Batteriesystemtypen Hochenergie (linke Abbildung) und Hochleistung (rechte Abbildung) im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	132
Abbildung 7.7:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) – Marktdurchdringung von Technologieelementen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	133
Abbildung 7.8:	Kostenreduktionspotentiale der Autonomiestufen 4 und 5 hinsichtlich des Anwendungsfalls „Autobahn“	135
Abbildung 7.9:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (SNF) - Marktanteile autonomer batterie- und brennstoffzellenelektrischer Fahrzeugkonzepte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“	137
Abbildung 7.10:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „geregelter Ruck“	139
Abbildung 7.11:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „geregelter Ruck“	140

Abbildung 7.12:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „geregelter Ruck“	142
Abbildung 7.13:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „geregelter Ruck“	143
Abbildung 7.14:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Veränderung der Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „geregelter Ruck“ – ohne Synergieeffekte	145
Abbildung 7.15:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „freies Spiel“	147
Abbildung 7.16:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „freies Spiel“	148
Abbildung 7.17:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „freies Spiel“	149
Abbildung 7.18:	Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO ₂ -Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „freies Spiel“	150
Abbildung 7.19:	Einordnung der Simulationsergebnisse bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten	152
Abbildung 7.20:	Einordnung der Simulationsergebnisse bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten	153
Abbildung 8.1:	Zentrale Ergebnisse der Szenarioanalysen (Gesamtmarkt) - Marktpotentiale	158
Abbildung 8.2:	Zentrale Ergebnisse der Szenarioanalysen (Gesamtmarkt) – Reduktion der WtW-CO ₂ -Emissionen und des Energieverbrauchs	160

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
AfA	Abschreibung für Abnutzung
AGR	Abgasrückführung
AMT	Automated Manual Transmission
ASC	Ammonia Slip Catalyst
ASM	Asynchronmaschine
ATL	Abgasturbolader
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BAT	Batteriesystem
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
BOP	Balance of Plant
CD	Charge Depleting
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CS	Charge Sustaining
D	Diesel
DAT	Deutsche Automobil Treuhand
DC	Direct Current
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DOD	Depth of Discharge
DOHC	Double Overhead Camshaft
DPF	Dieselpartikelfilter
DCCS	Dilution Controlled Combustion System
EStG	Einkommenssteuergesetz

EP	Effizienzpaket
ET	Einhand-Tensor
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
FC	Fuel Cell
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FHEV	Full Hybrid Electric Vehicle
HE	Hochenergie
HK	Herstellungskosten
HL	Hochleistung
HoT	House of Technology
ICE	Internal Combustion Engine
IGBT	Insulated Gate Bipolar-Transistor
IK	Investitionskosten
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KID	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LLK	Ladeluftkühler
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied Natural Gas
LT	Leak Test
MDBF	Mean Distance Between Failure
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
MT	Manual Transmission
MTBF	Mean Time Between Failure
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxide
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide

NT-PEM	Niedertemperatur Polymerelektrolyt-Membranbrennstoffzelle
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PT	Pressure Test
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
QFD	Quality Function Deployment
RCO	Relevant Cost of Ownership
REEV	Range Extended Electric Vehicle
RPE	Retail Price Equivalent
SCR	Selective Catalytic Reduction
SCU	Safety Control Unit
SNF	schwere Nutzfahrzeuge
SOC	State of Charge
SOHC	Single Overhead Camshaft
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SZ	Sattelzug
SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Total Cost of Ownership
TE	Technologieelement
tkm	Tonnenkilometer
TtW	Tank-to-Wheel
UTL	untere Teillast
VD	Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge
VECTO	Vehicle Energy Consumption Calculation Tool
VEU	Verkehrsentwicklung und Umwelt
VK	Verkehr in Kilometer
VTG	variable Turbinengeometrie
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle
WLTP	World Harmonized Light-Duty vehicle Test Procedure

WtW	Well-to-Wheel
ZFZR	zentrales Fahrzeugregister
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche in m^2
α	Fahrbahnsteigung in rad
a^{HU}	Häufigkeit der erforderlichen Hauptuntersuchungen über der Haltedauer
a^{SP}	Häufigkeit der erforderlichen Sicherheitsprüfungen über der Haltedauer
a^{LT}	Häufigkeit der erforderlichen Dichtheitsprüfungen über der Haltedauer
a^{PT}	Häufigkeit der erforderlichen Druckprüfungen über der Haltedauer
$ABV_{i,j}$	Verbrauch der Harnstofflösung AdBlue [®] für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in MJ/km
Al^{grav}	gravimetrische Auslastung in %
$a_{k,i,j}$	Basiswerte der Komponentenkosten pro Einheit der Kosteneinflussgröße je Komponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
β_i	Level-Parameter für das Fahrzeugsegment i (dimensionslos)
B	Amortisationsdauer in Jahren
b_e	mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch in g/kWh
b	Steigungsparameter (dimensionslos)
BVP_{Kr}	Bruttoverbraucherpreis des Kraftstoffs Kr in EUR/MJ
c_w	Luftwiderstandsbeiwert (dimensionslos)
C-Koeffizient	Verhältnis von Lade- bzw. Entladestrom in Ampere zur Batteriekapazität in Amperestunden
$\varepsilon_{i,j}$	Skalierungsfaktor für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
E	streckenbezogener Energieverbrauch in MJ/km
EF	elektrischer Fahranteil in %
ESt_{Kr}	Energiesteuer des Kraftstoffs Kr in EUR/MJ
$EV_{i,j}$	transportaufgabenspezifischer Energieverbrauch für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in MJ/km
FL^a	Fahrleistung pro Jahr in km

FL^{ges}	gesamte Fahrleistung über die Haltedauer in km
η_{BS}	mittlerer Wirkungsgrad des Batteriesystems in %
η_{BoP}	BoP-Faktor
$\eta_{\text{CS-Modus}}$	verbrennungsmotorischer Fahranteil in %
η_{E}	Wirkungsgrad des Endantriebs in %
η_{EM}	mittlerer Wirkungsgrad der elektrischen Maschine in %
η_{EM1}	mittlerer Wirkungsgrad der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb in %
η_{eff}	mittlerer effektiver Motorwirkungsgrad in %
$\eta_{\text{FC}_{\text{el}}}$	mittlerer elektrischer Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems in %
$\eta_{\text{FC-Stack}}$	Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks in %
η_{G}	Getriebewirkungsgrad in %
η_{HF}	Hybridisierungsfaktor
η_{I}	Stromwirkungsgrad in %
η_{LE}	mittlerer Wirkungsgrad der Leistungselektronik in %
η_{LE1}	mittlere Wirkungsgrad der zusätzlich benötigten Leistungselektronik in %
$\eta_{\text{RE}_{\text{ICE/FC}}}$	Wirkungsgrad des Range-Extender-Aggregats in %
η_{Re}	Potentialfaktor der Bremsenergierückgewinnung
$\eta_{\text{TtW}_{\text{ICE}}}$	TtW-Wirkungsgrad des ICE Antriebsstrangs in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{MHEV/FHEV/PHEV}_{\text{CS}}}}$	TtW-Wirkungsgrad der Antriebstränge MHEV, FHEV und PHEV im CS-Betriebsmodus in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{CD}}}}$	TtW-Wirkungsgrad des PHEV-Antriebstrangs im CD-Betriebsmodus in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{kombiniert}}}}$	TtW-Wirkungsgrad des PHEV-Antriebsstrangs in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{REEV}_{\text{REB}}}}$	TtW-Wirkungsgrad des REEV-Antriebsstrangs im Range-Extender-Betriebsmodus in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{BEV/REEV}}}$	TtW-Wirkungsgrad des BEV-Antriebsstrangs und des REEV-Antriebsstrangs im batterieelektrischen Betriebsmodus in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{REEV}_{\text{kombiniert}}}}$	TtW-Wirkungsgrad des REEV-Antriebsstrangs in %
$\eta_{\text{TtW}_{\text{FCEV}}}$	TtW-Wirkungsgrad des FCEV-Antriebsstrangs in %
η_{U}	Spannungswirkungsgrad in %

F_B	Beschleunigungswiderstandskraft in N
F_G	Gewichtskraft in N
F_L	Luftwiderstandskraft in N
F_{LWD}	Druckwiderstandskraft in N
F_{LWR}	Reibungswiderstandskraft in N
F_R	Rollwiderstandskraft in N
f_R	Rollwiderstandsbeiwert in ‰
F_{St}	Steigungswiderstandskraft in N
h	Haltedauer in Jahren
H_u	unterer Heizwert in kWh/g
$H_{k,i,j}$	Häufigkeit des Komponentenaustausches je Komponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
$H_{S,i,j}$	Häufigkeit eines Serviceschritts S für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
$HK_{i,j}^F$	Herstellkosten des Fahrzeugkonzeptes für das Segment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
HK_i^{Basis}	Herstellkosten des Basisfahrzeuges für das Segment i in EUR
HK_n^{TE}	Herstellkosten des Technologieelements n in EUR
HL	Kosten der Harnstofflösung AdBlue® in EUR/MJ
$HK_{i,j}^A$	Summe der konfigurationsabhängigen Kosten einzelner Antriebsstrangkomponenten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
$I_{i,j}^{HU}$	Intervall der Hauptuntersuchung für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in Monaten
$I_{i,j}^{SP}$	Intervall der Sicherheitsprüfung für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in Monaten
$I_{i,j}^{LT}$	Intervall der Dichtheitsprüfung für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in Monaten
$I_{i,j}^{PT}$	Intervall der Druckprüfung für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in Monaten
$IHK_{i,j}^a$	Instandhaltungskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$IK_{i,j}^F$	Investitionskosten des Fahrzeugkonzeptes für das Segment i mit der Antriebstechnologie j in EUR

$IK_{i,j}^I$	Investitionskosten der benötigten Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
$INSK_{i,j}^a$	Inspektionskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$INSK_{i,j}^{ges}$	gesamte Inspektionskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR über der Haltedauer
$ISK_{i,j}$	Instandsetzungskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$ISK_{i,j}^{ges}$	gesamte Instandsetzungskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR über der Haltedauer
K	eingesetztes Kapital in EUR
κ	Potentialfaktor (dimensionslos)
KS^{HU}	Kostensatz der Hauptuntersuchung in EUR
KS^{SP}	Kostensatz der Sicherheitsprüfung in EUR
KS^{LT}	Kostensatz der Dichtheitsprüfung in EUR
KS^{PT}	Kostensatz der Druckprüfung in EUR
$KE_{i,j}^a$	Kosten des Energieverbrauchs für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
λ_i	Level-Parameter für das Fahrzeugsegment i (dimensionslos)
$LK_{i,j}^{a,F}$	Laufende Kosten für das Fahrzeug im Segment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$LK_{i,j}^{a,I}$	Laufende Kosten für die Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$LK_{i,j}^{a,fix}$	konstanter Kostenanteil in EUR pro Jahr für das Fahrzeug im Segment i mit der Antriebstechnologie j
$LK_{i,j}^{a,var}$	variabler Kostenanteil in EUR pro Jahr für das Fahrzeug im Segment i mit der Antriebstechnologie j
$m_{i,j}^{leer}$	Leermasse eines Nutzfahrzeugkonzeptes des Fahrzeugsegments i und mit der Antriebstechnologie j in kg
m_i^{Basis}	Basismasse für das Fahrzeugsegment i in kg
$m_{k,i,j}^A$	Masse der Antriebsstrangkomponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in kg

$m_{i,j}^{\text{Zul}}$	Zuladung für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in kg
m_i^{zGG}	zulässiges Gesamtgewicht für das Fahrzeugsegment i in kg
$m_{i,j}^{\text{Sim}}$	Simulationsmasse des Fahrzeugkonzeptes im Segment i mit der Antriebstechnologie j in kg
M	komponentenspezifische Produktionsmenge
$MDBF_{k,i,j}$	Mean Distance Between Failure der Antriebsstrangkomponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in km
$ME_{S,i,j}$	Materialeinsatz bzgl. des Serviceschritts S für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
NEK_{Kr}	Nettoenergiekosten des Kraftstoffes Kr in EUR/MJ
n	betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer in Jahren
P_{BoP}	Leistung der BoP-Komponenten in kW
$P_{\text{FC-System}}$	Leistung des Brennstoffzellensystems in kW
$PE_{S,i,j}$	Personaleinsatz bzgl. des Serviceschritts S für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
$PE_{k,i,j}$	Personaleinsatz bzgl. des Tausches der Antriebsstrangkomponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
PK^a	Kosten des Fahrpersonals pro Jahr
R^a	Kapitalrückfluss in EUR pro Jahr
$RCO_{i,j}$	relevante Kosten der Fahrzeugnutzung eines Fahrzeugsegments i mit der Antriebstechnologie j
$RW_{i,j}^{\text{F}}$	Restwert des Fahrzeugkonzeptes im Segment i mit der Antriebstechnologie j zum Ende der Haltedauer
REB	Fahranteil im Range-Extender-Betriebsmodus in %
RP_n^{TE}	Potential zur Reduktion des Streckenverbrauchs des Technologieelements n in %
RP^{EP}	Reduktionspotential eines Effizienzpakets in %
ρ	Dichte der Luft in kg/m ³
r	Lernrate (dimensionslos)
σ	Gewichtungsfaktor (dimensionslos)
$S_{i,j}^{\text{F,I}}$	Subvention für die Infrastruktur und das Fahrzeug im Segment i mit der Antriebstechnologie j in EUR

$StV_{i,j}^F$	Steuervorteil für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j zum Ende der Haltedauer in EUR
SK	komponentenspezifische Stückkosten in EUR pro Einheit
$St_{i,j}^a$	Kfz-Steuer pro Jahr für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
s	Unternehmenssteuersatz in %
$T_{i,j}^a$	zu entrichtende Maut für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
T_n^{TE}	Technologieeffizienz des Technologieelements n
U_{real}	Betriebsspannung einer Brennstoffzelle
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs in m/s
$V_{i,j}^A$	Volumen des Antriebsstrangs für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in m^3
$V_{k,i,j}$	spezifisches Volumen der Komponente k für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in m^3
$Ver_{i,j}^a$	Kfz-Versicherungskosten in EUR pro Jahr für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
$WBK_{k,i,j}$	Wiederbeschaffungskosten der Antriebsstrangkomponente k für das Segment i mit der Antriebstechnologie j in EUR
$WK_{i,j}^a$	Wartungskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR pro Jahr
$WK_{i,j}^{\text{ges}}$	gesamte Wartungskosten für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j in EUR über der Haltedauer
$x_{k,i,j}$	Konfigurationsangabe der Antriebsstrangkomponente für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j
z	Zinssatz

1 Einführung

Mit einem Anteil von ca. 29 % am Endenergieverbrauch ist der Verkehrssektor der zweitgrößte sektorale Energieverbraucher in Deutschland [1]. Der Straßenverkehr dominiert dabei maßgeblich den verkehrsbedingten Anteil (ca. 83 %). Während der motorisierte Individualverkehr und der öffentliche Verkehr den Endenergieverbrauch im Zeitraum von 1991 bis 2015 um ca. 1 % bzw. ca. 32 % reduzieren konnten, stieg dieser bezüglich des Straßengüterverkehrs¹ im selben Zeitraum um ca. 15 % [2]. Diese Entwicklung ist auf eine fortschreitende Flexibilisierung der Logistik zurückzuführen, was ein zunehmendes Lieferaufkommen von kleinvolumigen und gestückelten Sendungen bedingt [3], [4]. Im Vergleich zum Warentransport über die Schiene oder das Wasser wird der straßengebundene Transport den Anforderungen aufgrund seiner Vorteile hinsichtlich der Flexibilität, Transportgeschwindigkeit und Netzbildungsfähigkeit besonders gerecht [4]. Vor diesem Hintergrund ist der hohe Anteil von etwa 70 % des Straßengüterverkehrs an der Verkehrsleistung² im Bundesgebiet zu erklären [2]. Zukünftig ist ein Wachstum der Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr in Höhe von ca. 1,7 % pro Jahr zu erwarten. Im Vergleich der Jahre 2010 zu 2030 resultiert dies in einer Steigerung der absoluten Transportleistung in Höhe von ca. 39 % [5]. Damit einhergehend ist von einer Steigerung der absoluten Emissionen, insbesondere von Kohlenstoffdioxid (CO₂), auszugehen [6]. Bei einem Kraftfahrzeugbestand von etwa 6 % entspricht der CO₂-Beitrag der für die Güterbeförderung ausgelegten und gebauten Kraftfahrzeuge etwa 27 % der Emissionen des Verkehrssektors [7], [8].

Mehr als 94 % der Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen innerhalb des deutschen Fahrzeugbestandes werden dieselmotorisch betrieben. Der Bestand an alternativen Antriebstechnologien beträgt in etwa 1 % und ist durch erdgasbetriebene Fahrzeuge mit einem Anteil von 0,63 % geprägt. Hybridisierte und rein elektrische Fahrzeugkonzepte haben einen Bestandsanteil von 0,12 % [9]. Darüber hinaus dominiert die Die-

¹ Der Straßengüterverkehr umfasst den gewerblichen Güterverkehr und den Werkverkehr.

² Die Begriffe „Verkehrsleistung“ und „Transportleistung“ werden synonym verwendet.

selstechnologie mit einem Anteil von über 96 % die jährlichen Neuzulassungen der Nutzfahrzeuge in Deutschland. Demgegenüber sind die Neuzulassungen alternativer Antriebstechnologien in Höhe von ca. 0,8 % marginal [10].

Aufgrund vorhandener Marktbarrieren zur Adoption neuartiger Technologien [6] und bisher nicht existenter regulatorischer Maßnahmen zur Verringerung der fahrzeugbedingten CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen^{3,4} wird mittel- bis langfristig ein höherer Anteil des Straßengüterverkehrs an den CO₂-Emissionen im Straßenverkehr erwartet. Diese Situation ist nicht vereinbar mit dem Ziel, formuliert im Weißbuch zum Verkehr, der Verringerung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen um 60 % bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Stand im Jahr 1990 [12]. Vor diesem Hintergrund ist eine der zentralen zukünftigen Herausforderung im Straßengüterverkehr, die fahrzeugbedingten CO₂-Emissionen trotz steigender Güterverkehrsleistung zu ökonomisch verträglichen Bedingungen⁵ zu reduzieren. In diesem Spannungsfeld sind die Rolle und der Beitrag alternativer Antriebstechnologien noch ungewiss. Durch die erwartete Einführung von CO₂-Emissionszielwerten für neu zugelassene schwere Nutzfahrzeuge, steigt der Handlungsdruck insbesondere auf die Nutzfahrzeughersteller sich neben inkrementellen Einzelmaßnahmen zur Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Nutzfahrzeugkonzepte⁶ auch auf alternative Antriebskonzepte zu fokussieren. Begrenzte Entwicklungsbudgets und ein harter Wettbewerb erfordern zielgerichtete Investitionen. Hierfür gilt es die Implikationen für das Technologieportfolio von Nutzfahrzeugherstellern aufgrund verschiedener CO₂-Regulierungsstrategien zu erforschen. Gleichmaßen sind die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen und den Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs zu untersuchen.

³ Im Gegensatz zu schweren Nutzfahrzeugen gilt sowohl für Personenkraftwagen als auch für leichte Nutzfahrzeuge eine Verpflichtung, hinsichtlich zugelassener Neuwagen, zur Verringerung der fahrzeugbedingten CO₂-Emissionen [11].

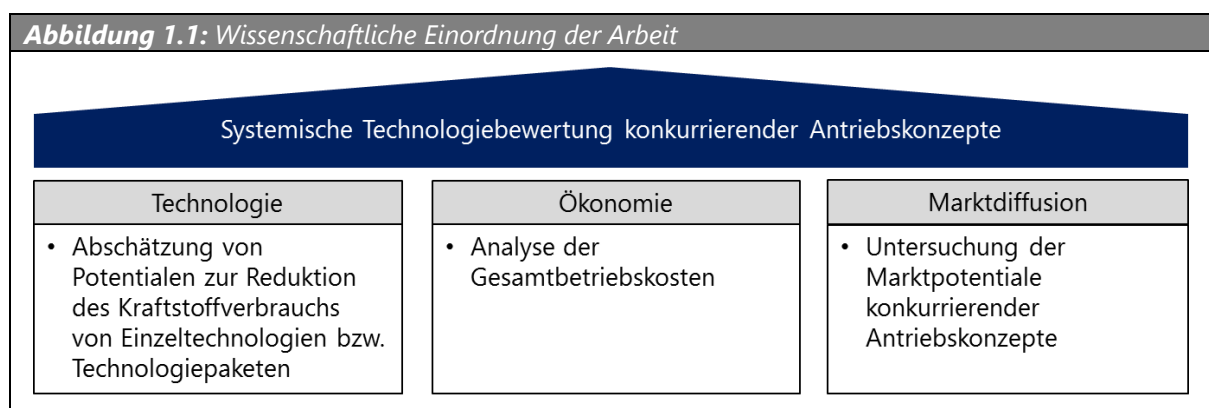
⁴ Schwere Nutzfahrzeuge entsprechen den Fahrzeugklassen N₂ und N₃ (siehe Kapitel 2.1).

⁵ Hierbei soll nicht die gesellschaftliche Perspektive, sondern die Perspektive eines einzelnen Fahrzeugnutzers bzw. zukünftigen Adopters einer bestimmten Technologie betrachtet werden.

⁶ Der Begriff „Nutzfahrzeugkonzept“ umfasst sowohl Solofahrzeuge als auch Fahrzeugkombinationen.

1.1 Stand des Wissens

Der wissenschaftliche Diskurs zur Bewältigung der eingangs beschriebenen Herausforderung im Straßengüterverkehr konzentriert sich im Wesentlichen auf die Abschätzung von Potentialen zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von Einzeltechnologien bzw. Technologiepaketen und die Analyse der Gesamtbetriebskosten. Lediglich vereinzelte Beiträge befassen sich mit der Untersuchung von Marktpotentialen konkurrierender Antriebskonzepte. Diese Arbeiten lassen sich den Überbegriffen Technologie, Ökonomie und Marktdiffusion zuordnen (siehe Abbildung 1.1).



Es existieren eine Vielzahl von Analysen zur Kraftstoffverbrauchsreduktion individueller Fahrzeugtechnologien oder Technologiepaketen [13]–[29]. Vornehmlich wurden Verbrauchsreduktionspotentiale konventioneller Antriebe berücksichtigt und vereinzelt der Einfluss der Elektrifizierung aufgezeigt. Grundsätzlich sind die erreichbaren Potentiale zur Verbrauchsreduzierung vom Einsatzbereich des Fahrzeuges, der Fahrzeugcharakteristika und insbesondere vom zugrunde gelegten Stand der Technik abhängig. Vollständige Angaben hierzu finden sich nur vereinzelt wieder. Weiterhin wurden im Rahmen von nur wenigen Arbeiten Modellsimulationen durchgeführt. Überwiegend basieren die Angaben zur Verbrauchsreduktion auf Expertenbefragungen und sind nicht entsprechend des Einsatzbereichs differenziert. Verbesserungspotentiale alternativer Antriebskonzepte wie z.B. rein batterie- oder brennstoffzellenelektrischer Nutzfahrzeugkonzepte und deren Komponenten blieben unberücksichtigt. Weiterhin bezieht sich der überwiegende Anteil der Studien auf Erkenntnisse

aus Nordamerika und basiert demnach, im Vergleich zu Europa oder Deutschland, auf anderen Rahmenbedingungen z.B. hinsichtlich der zulässigen Fahrzeugabmessungen, Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Streckenprofile. Diese Erkenntnisse können daher nur eingeschränkt auf den deutschen Neuwagenmarkt von Nutzfahrzeugen übertragen werden.

Die meist technische Betrachtung wird um ökonomische Aspekte im Rahmen von Analysen der Gesamtbetriebskosten⁷ erweitert [14], [20], [25], [30]–[38]. Hierdurch wird ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit konkurrierender Nutzfahrzeugkonzepte sowie Technologien und Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion unter Berücksichtigung spezifischer Rahmenbedingungen ermöglicht. Kritische Erfolgsfaktoren dieser Analysen sind die zugrunde liegenden Anschaffungs- und Betriebskosten. Größtenteils werden im Rahmen dieser Analysen nur vereinzelte Fahrzeugsegmente und Antriebsoptionen betrachtet. Auch werden in nur wenigen Analysen konkrete Angaben zum Einsatzbereich gegeben. Eine umfassende Analyse der für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland relevanten Fahrzeugsegmente, Antriebsoptionen und Einsatzbereiche ist nicht bekannt. Erforderliche und ausschlaggebende Eingangsgrößen, wie z.B. der Energieverbrauch oder die Instandhaltungskosten, basieren zumeist auf Expertenschätzungen und nicht auf der Anwendung von Modellrechnungen. Eine quantitative Ermittlung von spezifischen Instandhaltungskosten und Restwerten für Nutzfahrzeugkonzepte mit alternativen Antriebstechnologien wurde nicht durchgeführt.

Ansätze zur Modellierung der Diffusion emissionsreduzierender Technologien bzw. Fahrzeugkonzepte für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge sind in [39]–[41] zusammenfassend dargestellt und erläutert. Die Modellierung hinsichtlich schwerer Nutzfahrzeuge erfolgte erst in jüngster Vergangenheit. Im Folgenden werden diese erläutert und Limitationen aufgezeigt.

⁷ In der Literatur wird zumeist auch der Begriff „Total Cost of Ownership“ (TCO) verwendet.

Mittels eines systemdynamischen „*top-down*“⁸-Modellierungsansatzes wird in [42] und [43] das Marktpotential alternativer Antriebssysteme hinsichtlich schwerer Nutzfahrzeuge unter Berücksichtigung verschiedener Einsatzbereiche bis zum Jahr 2050 analysiert. Die Technologiediffusion erfolgt dabei kostenbasiert. Weiterhin wurde zur Berücksichtigung von Skaleneffekten die Lernkurventheorie nach Theodore Paul Wright (1936)⁹ implementiert. Im Rahmen der Arbeiten [45] und [46] erfolgte die Entwicklung eines systemdynamischen Prognosemodells ebenso mittels eines „*top-down*“-Modellierungsansatzes mit dem Ziel, die Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von Nutzfahrzeugen zu analysieren. Der betrachtete Zeithorizont erstreckt sich bis zum Jahr 2035. Im Schwerpunkt wird dabei das organisationale Adoptionsverhalten bezüglich innovativer Antriebstechnologien empirisch untersucht. Weiterhin erfolgte die Integration einer agentenbasierten Perspektive unter Berücksichtigung einer diskreten Kaufentscheidung. Grundsätzlich erfordert der verwendete „*top-down*“-Modellierungsansatz einen hohen Grad an Vereinfachung und Aggregation des Marktes. Die zuletzt benannten und kurz erläuterten Marktanalysen beziehen sich auf den deutschen Automobilmarkt und betrachten ausschließlich schwere Nutzfahrzeuge. Potentielle Synergieeffekte mit dem Markt für leichte Nutzfahrzeuge oder dem Markt für Personenkraftwagen bleiben unberücksichtigt. Es erfolgte eine grundlegende Vereinfachung in der exogenen Vorauswahl der betrachteten Fahrzeugsegmente und der berücksichtigten Effizienzpotentiale. Die zugrunde gelegten Effizienzpotentiale sind den bereits genannten technischen Studien entnommen. Weitere Arbeiten verwenden logistische Regressionsmodelle zur Ermittlung von Marktanteilen alternativer Antriebstechnologien. Die Analysen im Rahmen von [20] beziehen sich auf den österreichischen Fahrzeugmarkt und umfassen sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge. Der Betrachtungszeitraum erstreckt sich bis zum Jahr 2050. Die Ermittlung der technologiespezifischen Marktanteile basiert auf einer Kostenbetrachtung und wird durch Marktbarrieren, wie z.B. eine begrenzte Inf-

⁸ Ausgehend von einem hohen Abstraktionsgrad erfolgt eine zunehmende Konkretisierung. Ein Gesamtproblem wird in Teilprobleme aufgeteilt, diese evtl. in weitere Teilprobleme etc.

⁹ siehe hierzu [44]

rastruktur- und Modellverfügbarkeit, eingeschränkt. Das Fahrzeug- und Technologieangebot der schweren Nutzfahrzeuge ist jedoch auf konventionelle und hybride Antriebstechnologien beschränkt. Die im Rahmen von [47] durchgeführten Analysen beziehen sich auf den deutschen Fahrzeugmarkt und umfassen ebenfalls sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge. Auf Basis der ermittelten Gesamtbetriebskosten für die Eckjahre 2015 und 2030, sowie der Berücksichtigung einer beschränkten Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Infrastruktur im Zeitverlauf, wird die Marktdiffusion alternativer Antriebsarten bestimmt. In diesem Zusammenhang ist der antriebstechnologische Kontext simplifiziert abgebildet. Eine Berücksichtigung verschiedener Transportaufgaben erfolgt nicht. Zudem bleiben aufgrund der statischen Betrachtungsweise hinsichtlich der Gesamtbetriebskosten etwaige Einflüsse bzw. Wechselwirkungen, verursacht durch sich über den Zeitverlauf wandelnde Rahmenbedingungen, unberücksichtigt. Das für den amerikanischen Fahrzeugmarkt entwickelte „TRUCK“-Modell wird in [48] erläutert. Auf Basis exogener Eingabedaten wie z.B. Energieverbrauch, Fahrzeugkosten, Kraftstoffkosten, Instandhaltungskosten, Aufpreisbereitschaft und Amortisationsdauer werden Marktdurchdringungsraten einzelner Technologieoptionen, spezifisch nach Fahrzeugklassen und Antriebstechnologien, bestimmt. Die Auswahl der Technologien ist dabei sehr eingeschränkt. Darüber hinaus werden die auf einem Kraftfahrzeugmarkt wirkenden Mechanismen nur eingeschränkt berücksichtigt.

Schließlich existieren Studien von Shell Deutschland Oil GmbH, McKinsey & Company, Inc. und Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, die Marktpotentiale alternativer Antriebskonzepte thematisieren. Im Rahmen von [49] sind die betrachteten Szenarien narrativ-literarisch und besitzen einen stark qualitativen Charakter. Eine systemdynamische Modellierung findet nicht statt. Es werden sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge betrachtet. Die Analysen beziehen sich auf Deutschland und ausschließlich auf das Jahr 2040. Bei [50] werden die Marktpotentiale batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge auf Basis eines Diffusionsmodells unter Berücksichtigung von Gesamtbetriebskosten, der Fahrzeug- und Infrastrukturverfügbarkeit sowie

lokaler und nationaler Regulierungen bestimmt. Die durchgeführten Szenarioanalysen beziehen sich dabei auf verschiedene Weltregionen wie die Vereinigten Staaten von Amerika, China und Europa. In [51] wurden die Marktpotentiale alternativer Antriebskonzepte bei Nutzfahrzeugen für das Jahr 2026 und für Deutschland modelliert. Allerdings entziehen sich die in [50] und [51] verwendeten Modellierungsansätze einer Einordnung und Diskussion, da diese nicht publiziert sind.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass in bisherigen Analysen entweder das technologische Potential zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Nutzfahrzeugkonzepte oder die Gesamtbetriebskostenanalyse im Fokus steht. Eine systemdynamische Modellierung der Marktdiffusion alternativer Antriebstechnologien ist nur vereinzelt Gegenstand der Untersuchungen. Grundsätzlich ist eine umfassende, konsistente und transparente Analyse konkurrierender Antriebssysteme nicht existent. Ausschließlich werden der fahrzeugsegmentspezifische, der anwendungsspezifische, der antriebstechnologische sowie der ökonomische Kontext simplifiziert und eingeschränkt abgebildet. Ebenso werden die Implikationen auf das Technologieportfolio von Nutzfahrzeugherstellern aufgrund einer wirksamen CO₂-Regulierung sowie einer möglichen Nutzung von Synergieeffekten, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, nicht aufgezeigt. Somit sind die Diffusion alternativer Antriebstechnologien und deren Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen im Hinblick auf den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt noch unzureichend erforscht. Damit verbunden liegt eine hohe Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung vor. Um dieser Forschungslücke zu begegnen, bedarf es einer umfassenden Analyse mit den nun folgenden besonderen Merkmalen:

- Umfassende und transportaufgabenspezifische Betrachtung des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes. Diese adressiert die wesentlichen Fahrzeugsegmente und Transportaufgaben.

- Konsistente und transparente Bewertung des antriebstechnologischen und ökonomischen Kontextes unter Einbeziehung von Fahrzeugsimulations- und Technologiedaten.
- Simulation der Marktpotentiale unter Berücksichtigung von Flottenzielwerten und Synergieeffekten, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen.
- Auf Basis neuartiger empirischer Daten zur Jahresfahrleistung (transportaufgaben- und fahrzeugsegmentspezifische Häufigkeitsverteilung).

1.2 Zielsetzung und adressierte Forschungsfragen

Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist die Durchführung umfassender Szenarioanalysen zur Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes in Deutschland, um fundierte Handlungsempfehlungen für eine zukünftige Entwicklung alternativer Antriebskonzepte und der damit einhergehenden Reduktion der CO₂-Emissionen sowie des Endenergieverbrauchs abzuleiten. Der Zeithorizont reicht bis zum Jahr 2040. Zur Erfüllung der übergeordneten Zielsetzung sind im Besonderen die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- Welche Implikationen sind für das Technologieportfolio von Nutzfahrzeughersteller aufgrund verschiedener CO₂-Regulierungsstrategien zu erwarten?
- Wie entwickeln sich die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes unter Berücksichtigung verschiedener CO₂-Regulierungsstrategien?
- Welchen Einfluss üben Synergieeffekte, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, auf die Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte bei Nutzfahrzeugen aus?

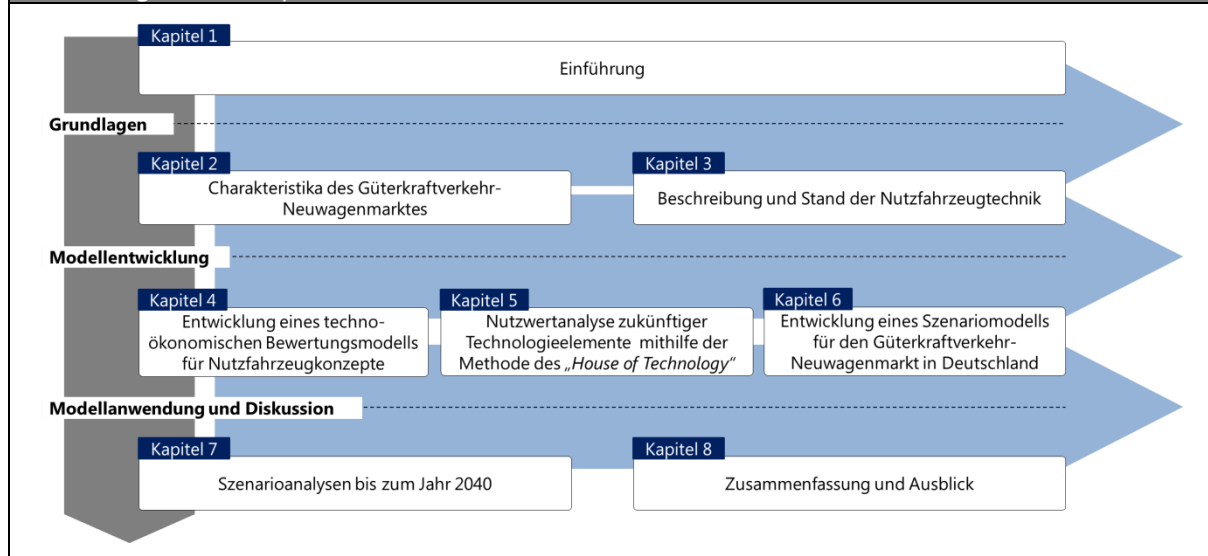
Da sich diese Fragestellungen auf Basis der bestehenden Arbeiten nur unzureichend beantworten lassen, widmet sich diese Arbeit einer umfassenden systemischen Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftver-

kehr-Neuwagenmarktes in Deutschland. Hierfür werden die zuvor benannten Merkmale im Besonderen adressiert.

1.3 Methodisches Vorgehen

Zur Erreichung der Zielsetzung und Beantwortung der Forschungsfragen gliedert sich die Arbeit in insgesamt acht Kapitel (siehe Abbildung 1.2).

In Kapitel 2 wird der Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt charakterisiert und damit der Betrachtungsrahmen definiert. Dies umfasst die Beschreibung relevanter Fahrzeugsegmente und die Erläuterung des organisationalen Adoptionsverhaltens. Das Kapitel 3 vermittelt den aktuellen Stand der Nutzfahrzeugtechnik und definiert die dem Betrachtungsrahmen zugrunde liegende, technologische Ausgangsbasis. Die Entwicklung eines Bewertungsmodells zur techno-ökonomischen Evaluation von Nutzfahrzeugkonzepten ist Gegenstand von Kapitel 4. Anschließend wird auf die Nutzwertanalyse zukünftiger Technologieelemente mithilfe der Methode des „*House of Technology*“ (HoT) eingegangen (Kapitel 5). In Kapitel 6 wird der Kontext der Marktdiffusion konkurrierender Nutzfahrzeugkonzepte aufgegriffen und sich mit der Entwicklung des Szenariomodells für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland vertieft befasst. Die Anwendung des entwickelten Szenariomodells erfolgt im Rahmen von Kapitel 7. Schließlich werden in Kapitel 8 die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung und der Industrie abgeleitet. Zudem wird auf die Limitationen der Arbeit und den weiteren Forschungsbedarf hingewiesen.

Abbildung 1.2: Konzeptioneller Aufbau der Arbeit

2 Charakteristika des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes

Generell steht im Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt, wie in jedem Markt üblich, das Angebot der Nachfrage gegenüber [52]. Sowohl das Angebot als auch die Nachfrage sind durch verschiedene Rahmenbedingungen beeinflusst. Auf Basis einzelner Kaufentscheidungsprozesse erfolgt ein Markteintritt neuer oder bereits im System vorhandener Fahrzeugkonzepte. Übertragen auf den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt fragen Flottenbetreiber¹⁰ Nutzfahrzeugkonzepte nach. Das Ziel dieses Kapitels ist es, die für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland relevanten Fahrzeugsegmente zu identifizieren und zu beschreiben. Weiterhin wird das organisationale Adoptionsverhalten näher erläutert.

2.1 Identifikation und Beschreibung relevanter Fahrzeugsegmente

Nutzkraftwagen¹¹, die nach der Bauart zur Beförderung von Gütern und zum Ziehen von Anhängerfahrzeugen bestimmt sind, untergliedern sich entsprechend der Normung in Lastkraftwagen und Zugmaschinen [53]. In einer weiteren Unterebene werden Lastkraftwagen nach Vielzwecklastkraftwagen und Speziallastkraftwagen unterschieden. Zugmaschinen sind den Anhängerzugmaschinen oder den Sattelzugmaschinen zuzuordnen. Anhängerfahrzeuge sind nicht selbst fahrende Straßenfahrzeuge, die nach der Bauart dazu bestimmt sind, von einem Kraftfahrzeug mitgeführt zu werden. Anhängerfahrzeuge, die zum Transport von Gütern bestimmt sind, untergliedern sich in Deichselanhänger (gelenkt oder starr), Sattelanhänger und Spezialanhänger. Als Fahrzeugkombination wird die Zusammenstellung aus einem Nutzkraftwagen und einem Anhängerfahrzeug verstanden [53]. Gemäß der europäischen Genehmigungsrichtlinie (2007/46/EG) von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhänger, werden Nutzkraftwagen und Anhängerfahrzeuge in verschiedene Fahrzeugklassen hinsichtlich ihrer zulässigen Gesamtmasse eingeteilt (siehe hierzu Tabelle 2.1) [54].

¹⁰ Unter Flottenbetreiber werden Verkehrsunternehmen wie z.B. Transport- oder Speditionsunternehmen verstanden, zu deren Unternehmenszweck die Güterbeförderung per Kraftfahrzeug für andere gegen Entgelt durchgeführt wird.

¹¹ Die Begriffe Nutzkraftwagen und Nutzfahrzeug werden synonym verwendet.

Tabelle 2.1: Begriffsbestimmung der Fahrzeugklassen von Nutzkraftwagen und Anhängerfahrzeugen

Klasse N:	Für die Güterbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern
Klasse N ₁ :	mit zulässiger Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen
Klasse N ₂ :	mit zulässiger Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen bis zu 12 Tonnen
Klasse N ₃ :	mit zulässiger Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen
Klasse O:	Anhänger (einschließlich Sattelanhänger)
Klasse O ₁ :	mit zulässiger Gesamtmasse bis zu 0,75 Tonnen
Klasse O ₂ :	mit zulässiger Gesamtmasse von mehr als 0,75 Tonnen bis zu 3,5 Tonnen
Klasse O ₃ :	mit zulässiger Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen bis zu 10 Tonnen
Klasse O ₄ :	mit zulässiger Gesamtmasse von mehr als 10 Tonnen

Quelle: [54]

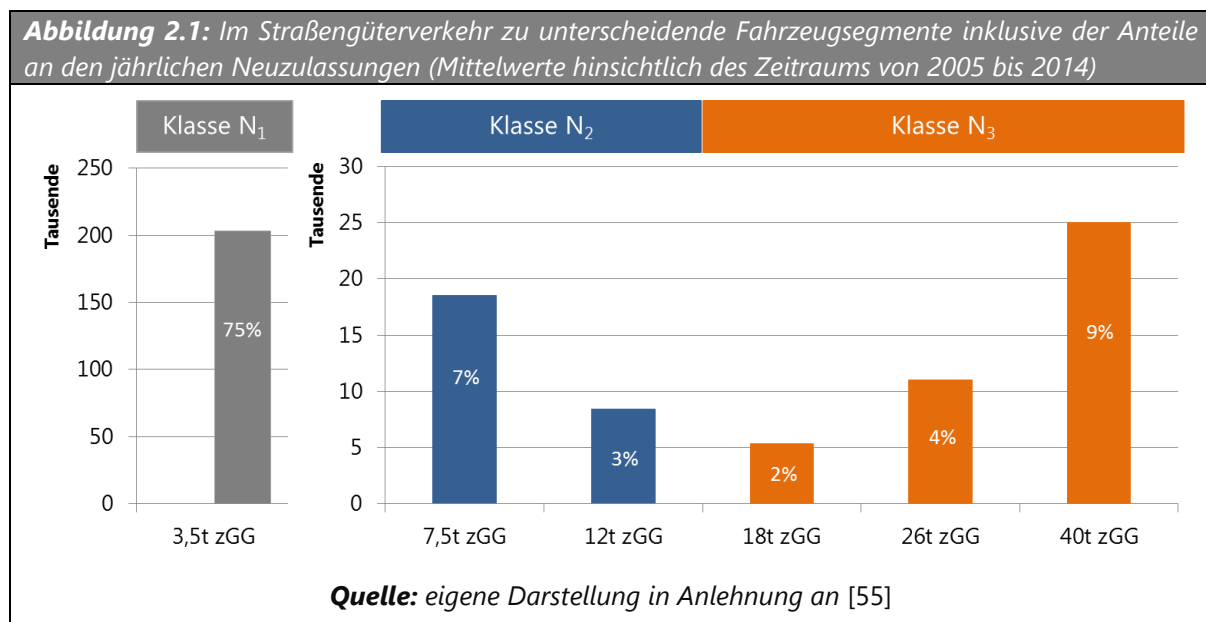
Unter Berücksichtigung der Fahrzeugklassen N₁, N₂, N₃ sowie Nutzkraftwagen, die im Straßengüterverkehr und die nicht im Baustellenverkehr eingesetzt werden, dominieren im Wesentlichen sechs Fahrzeugsegmente die Neuzulassungen (siehe Abbildung 2.1). In Deutschland werden jährlich durchschnittlich ca. 272.000 Nutzkraftwagen der betrachteten Fahrzeugsegmente neu zugelassen¹² [55]. Der größte Zulassungsanteil in Höhe von ca. 75 % entfällt auf die Fahrzeuge der Klasse N₁. Quantitativ dominieren¹³ innerhalb dieser Klasse zweiachsige Kraftfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG)¹⁴ von 3,5 t. Der Anteil von Kraftfahrzeugen der Klasse N₂ beträgt ca. 7 %. Dabei dominieren zum einen zweiachsige Lastkraftwagen mit einem zGG in Höhe von 7,5 t und zum anderen zweiachsige Lastkraftwagen mit einem zGG in Höhe von 12 t. Der Zulassungsanteil von Lastkraftwagen (exklusive Sattelzugmaschinen) der Klasse N₃ beträgt ca. 6 %. Bezüglich der zweiachsigen Lastkraftwagen dominieren Kraftfahrzeuge mit einem zGG in Höhe von 18 t. Hinsichtlich dreiachsiger Lastkraftwagen dominieren Kraftfahrzeuge mit einem zGG in Höhe von 26 t. Etwa 9 % der Neuzulassungen sind Sattelzugmaschinen. Dabei dominieren zweiachsige Sattelzug-

¹² Unter Berücksichtigung der jährlichen Neuzulassungen im Zeitraum von 2005 bis 2014. Für den interessierten Leser ist die Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen je Fahrzeugklasse im Anhang A grafisch dargestellt.

¹³ Unter quantitativ dominierend werden Fahrzeuggrößenklassen mit mehr als 50 % Neuzulassungsanteil verstanden.

¹⁴ zulässiges Gesamtgewicht und zulässige Gesamtmasse werden synonym verwendet.

maschinen mit einem zGG in Höhe von 18 t. In Kombination mit einem dreiachsigen Sattelaufleger¹⁵ wird ein zGG in Höhe von 40 t ermöglicht.



Im Betrachtungszeitraum von 2005 bis 2014 wurden in Deutschland durchschnittlich etwa 80 % der tatsächlichen Güterverkehrsleistung^{16,17} durch deutsche Lastkraftfahrzeuge im Binnenverkehr erbracht [56]. Im Jahre 2014 betrug der Anteil ca. 85 % und entsprach ca. 310 Mrd. tkm. Somit sind etwa 15 % der Güterverkehrsleistung im grenzüberschreitenden Verkehr erbracht worden. Die Erbringung von Transportdienstleistungen innerhalb Deutschlands durch ausländische Verkehrsunternehmen (Kabotage) war demgegenüber geringfügig. Zum Jahr 2014 beträgt der Anteil der Güterverkehrsleistung des gewerblichen Verkehrs¹⁸ ca. 86 %. Dabei wurden durchschnittlich ca. 90 % der Güterverkehrsleistung durch Einzelfahrten erbracht [56]. Als

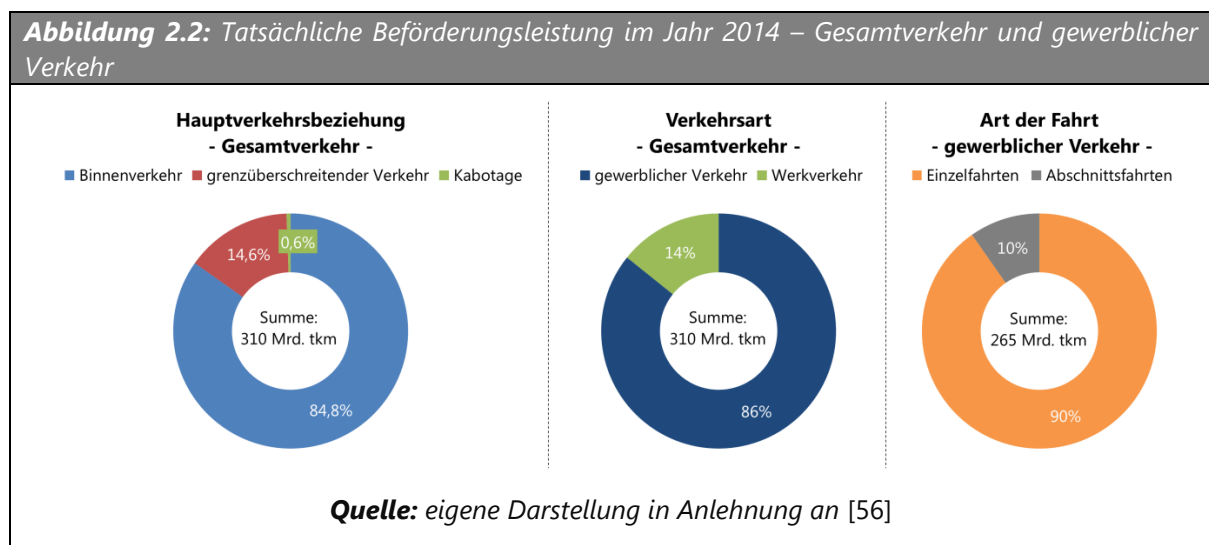
¹⁵ Unter Betrachtung der Jahre 2005 bis 2014 betrug die mittlere tatsächliche Beförderungsleistung von Sattelzügen mit einer Achskombination 2+3-Achsen 95 % [56].

¹⁶ Die Güterverkehrsleistung ist eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung der beförderten Gütermenge entsprechend der zurückgelegten Transportweite. Diese wird in Tonnenkilometern (tkm) angegeben.

¹⁷ Die tatsächliche Güterverkehrsleistung berücksichtigt die gravimetrische Auslastung.

¹⁸ Unter dem gewerblichen Verkehr wird die entgeltliche oder geschäftsmäßige Beförderung von Gütern verstanden. Unter dem Werkverkehr wird der Güterkraftverkehr für eigene Zwecke eines Unternehmens, der unter gegebenen Voraussetzungen erfolgt (siehe hierzu § 1 Absatz 2 GüKG), verstanden.

Einzelfahrt ist die direkte Fahrt von einem Belade- zu einem Entladeort zu verstehen. Abschnittsfahrten gliedern sich nach Pendelfahrten und Fahrten im kombinierten Verkehr. Diese sind mit einem Anteil von ca. 8 % bzw. ca. 2 % marginal [56]. Abbildung 2.2 verdeutlicht die genannten prozentualen Anteile, hinsichtlich der tatsächlichen Beförderungsleistung im Jahr 2014, nach Hauptverkehrsbeziehung, Verkehrsart und Art der Fahrt. Diese beziehen sich zu Teilen auf den Gesamtverkehr und zu Teilen auf den gewerblichen Verkehr.



Folglich sind im Fokus der weiteren Analysen in Deutschland zugelassene Nutzfahrzeugkonzepte, die zur entgeltlichen oder geschäftsmäßigen Beförderung von Gütern (gewerblicher Verkehr) im Rahmen von Einzelfahrten im Binnenverkehr eingesetzt werden. Auf Basis der zuvor gewonnenen Erkenntnisse stehen die innerhalb Tabelle 2.2 aufgelisteten Nutzfahrzeugkonzepte im Fokus der weiteren Betrachtungen.

Tabelle 2.2: Relevante und betrachtete Nutzfahrzeugkonzepte				
Fahrzeug- klasse	Bezeichnung	zGG	Anzahl Achsen	max. zulässige Abmes- sungen (H×B×L)
N ₁	Leichter Transporter Kastenwagen	3,5 t	2	
N ₂	Leichter Solo-Lkw mit Kofferaufbau	7,5 t	2	
	Leichter Solo-Lkw mit Kofferaufbau	12 t	2	4,00 m × 2,55 m × 12,00 m
N ₃	Schwerer Solo-Lkw mit Kofferaufbau	18 t	2	
	Schwerer Solo-Lkw mit Kofferaufbau	26 t	3	
	Sattelzug mit geschlossenem Aufbau	40 t	2+3	4,00 m × 2,55 m × 16,50 m

Die berücksichtigten Nutzkraftwagen umfassen somit die Fahrzeugklassen N₁, N₂, N₃ und treten in Form von Transporter-Kastenwagen, Vielzwecklastkraftwagen und Sattelzug in Erscheinung. Es werden nur Konfigurationen mit zwei oder drei Achsen betrachtet. Damit ausgenommen sind Nutzfahrzeuge, die zum Personentransport, im land- bzw. forstwirtschaftlichen Verkehr oder zu anderen Zwecken wie zum Beispiel als Löschfahrzeug oder im Baustellenverkehr eingesetzt werden. Aus der Vielzahl möglicher Anhängerfahrzeuge werden ausschließlich Anhänger der Klasse O₄ in Form von 3-Achs Sattelanhängern betrachtet.

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs und für die Investitionskostenrechnung ist es erforderlich, Nutzfahrzeugkonzepte hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften detaillierter zu beschreiben. Bandbreiten relevanter Merkmale, wie z.B. der Querschnittsfläche, des Luftwiderstandsbeiwertes und des Rollwiderstandsbeiwertes sind der Tabelle 2.3 zu entnehmen. Die Wertebereiche lassen auf eine hohe Vielfalt an energieverbrauchsrelevanten Varianten innerhalb eines Fahrzeugsegmentes schließen. Dies gilt ebenso für die antriebsstrangrelevanten Parameter (siehe Tabelle 2.4). Hierbei wurden die jeweils untere und obere Portfoliogrenze verschiedener Kraftfahrzeughersteller bzgl. der Standardausführung von entsprechenden Serienfahrzeugen berücksichtigt (siehe hierzu Anhang B, Tabellen B.9 bis B.14).

Tabelle 2.3: Bandbreiten der Querschnittsfläche, Luftwiderstands- und Rollwiderstandsbeiwerte von Nutzfahrzeugkonzepten

Fahrzeugsegment	Querschnittsfläche A in m^2	Luftwiderstandsbeiwert c_W	Rollwiderstandsbeiwert f_R in ‰
3,5t zGG	3,1-4,2	0,35-0,40	6,5-12,1
7,5t zGG	4,5-10,0	0,40-0,65	4,0-10,6
12t zGG			
18t zGG	6,0-10,0	0,45-0,65	4,0-8,1
26t zGG			
40t zGG	7,0-10,0	0,45-0,75	4,0-8,1

Quellen: eigene Analyse in Anlehnung an [54], [57]–[62]

Tabelle 2.4: Bandbreiten antriebsstrangrelevanter Parameter von Nutzfahrzeugkonzepten

Fahrzeugsegment	Leistung in kW	Drehmoment in Nm	Tankinhalt in l	Leergewicht in kg	Nutzlast; Nutzvolumen in kg; m^3
3,5t zGG	70-150	250-470	70-105	1.660-2.400	1.100-1.840; 17
7,5t zGG	110-170	570-900	110-150	3.962-4.525	2.975-3.538; 38
12t zGG	115-220	650-1.200	110-150	4.752-6.380	5.620-7.248; 38
18t zGG	164-460	850-3.000	120-450	7.779-11.479	6.521-10.221; 50
26t zGG	184-460	950-3.000	290-450	9.380-11.881	13.290-16.620; 50
40t zGG	265-537	1.700-3.500	160-1.420	13.417-15.547	24.453-26.583; 90

Quellen: eigene Analyse in Anlehnung an Herstellerangaben und [63]

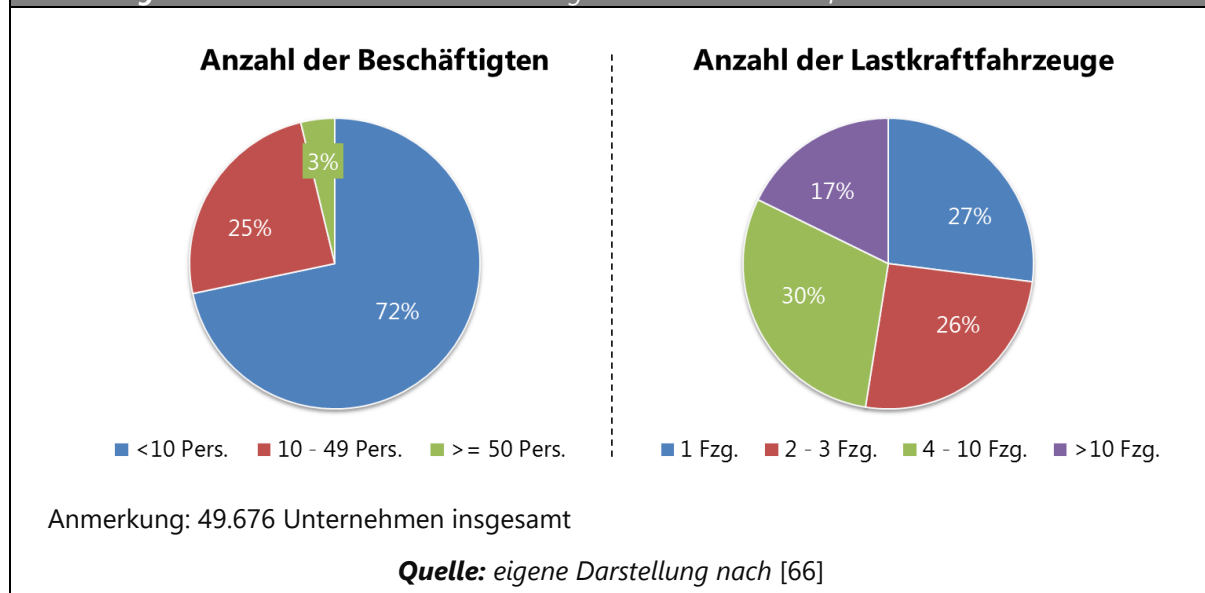
Da mit einem Anteil von größer als 95 % der dieselmotorische Antriebsstrang die Neuzulassungen deutlich dominiert, sind die innerhalb Tabelle 2.4 angegebenen Werte von dieselmotorisch betriebenen Nutzfahrzeugkonzepten abgeleitet worden [55]. Die angegebene Leistung sowie das angegebene Drehmoment entsprechen jeweils dem Maximum. Die zugrunde gelegte Definition des Leergewichts ist herstellerabhängig und nicht immer eindeutig, weshalb die angegebenen Bandbreiten als Richtwerte zu verstehen sind¹⁹.

¹⁹ Grundsätzlich wird sich bzgl. der Definition des Leergewichtes an die Europäische Regelung und somit der Richtlinie 97/27/EG angelehnt.

2.2 Organisationales Adoptionsverhalten

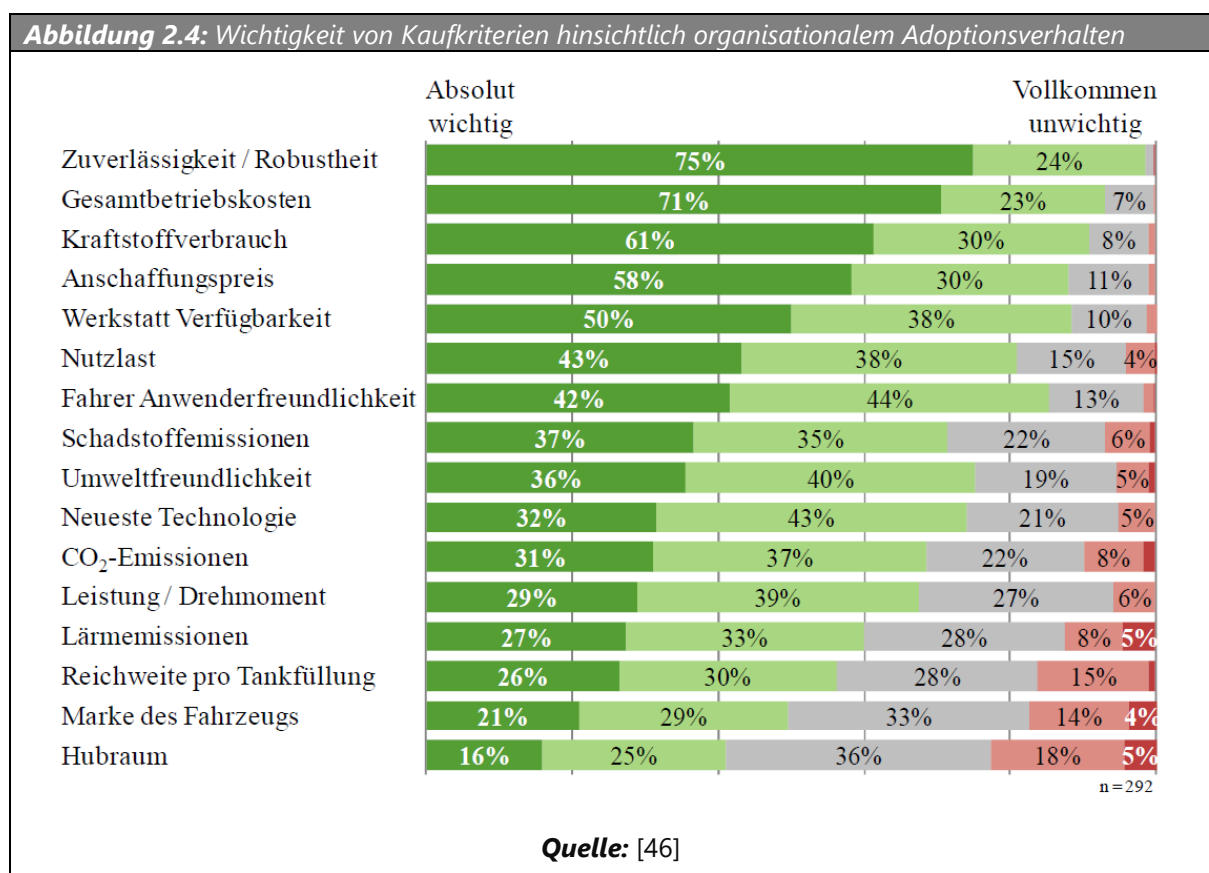
Die Innovationsfähigkeit eines Unternehmens wird auf die Unternehmensstruktur, das individuelle unternehmerische Handeln und externe Einflüsse zurückgeführt [64], [65]. Die Unternehmensstruktur wird maßgeblich durch die Größe des Unternehmens bestimmt, für welche wiederum die Mitarbeiterzahl eine geeignete Kenngröße ist. Im Rahmen von empirischen Analysen wurde die Größe eines Unternehmens als ein bedeutender Einflussfaktor hinsichtlich des organisationalen Adoptionsverhaltens neuer Technologien identifiziert. Mit steigender Mitarbeiterzahl und wachsender Flottengröße steigt die Auswahlbereitschaft für alternative Antriebstechnologien [46]. Entsprechend der vom Bundesamt für Güterverkehr (BAG) herausgegebenen Unternehmensstatistik entsprechen 97 % der Unternehmen im gewerblichen Güterkraftverkehr kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) mit weniger als 50 Beschäftigten. 72 % der Unternehmen sind darüber hinaus Kleinstunternehmen mit unter 10 Beschäftigten (siehe Abbildung 2.3). Die Anzahl der eingesetzten Lastkraftfahrzeuge ist bei etwa 83 % der Unternehmen kleiner oder gleich zehn Fahrzeuge.

Abbildung 2.3: Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs

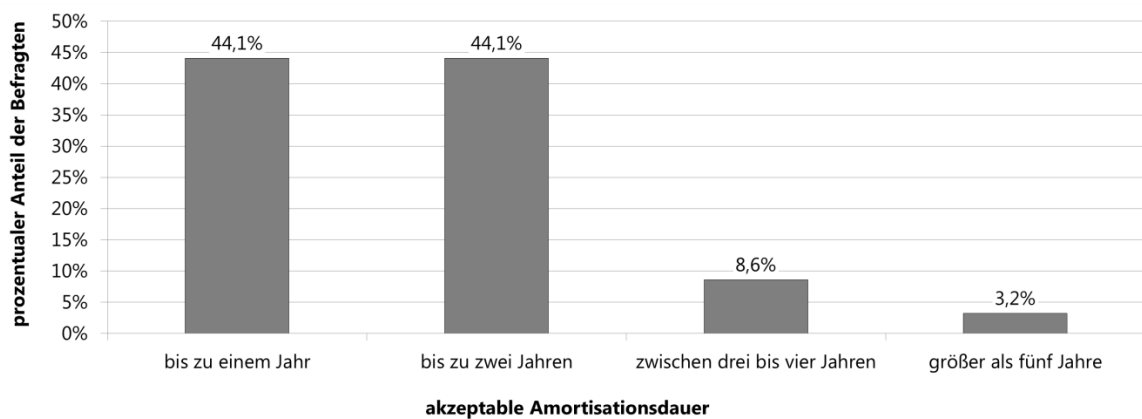


Die Anschaffung von Nutzkraftwagen entspricht einer „Business-to-Business“ (B2B) Beziehung, wobei der Prozess überwiegend standardisiert ist und auf einem mit In-

formationen (techno-ökonomisch) gestützten Verfahren unter Berücksichtigung individueller Kaufkriterien basiert [46]. Im Vergleich zu Anschaffungen im Rahmen einer „Business-to-Consumer“ (B2C) Beziehung werden die Entscheidungen mit einer höheren Rationalität und einer geringeren Spontaneität getroffen [67]. In absteigender Rangfolge sind neben der Zuverlässigkeit und Robustheit, die Gesamtbetriebskosten über der Nutzungsdauer, der Kraftstoffverbrauch, der Anschaffungspreis und die Verfügbarkeit an Werkstätten wesentliche Entscheidungskriterien von Unternehmen (siehe hierzu Abbildung 2.4).



Auch die Amortisationsdauer stellt ein weiteres maßgebliches Kriterium von Fahrzeugbetreibern hinsichtlich der Adoptionsentscheidung alternativer oder zusätzlicher Technologieoptionen dar [18], [19], [25], [32], [68], [69]. Entsprechend einer empirischen Erhebung befinden jeweils ca. 44 % eine Amortisationsdauer bis zu einem Jahr bzw. bis zu zwei Jahren als akzeptabel, wohingegen ca. 12 % der Befragten eine Amortisationsdauer von mehr als zwei Jahren akzeptieren (siehe Abbildung 2.5).

Abbildung 2.5: Akzeptable Amortisationsdauern für Nutzfahrzeugbetreiber

Anmerkung: Stichprobenumfang n=119

Quelle: [70]

Extern wirkende Einflüsse auf das organisationale Adoptionsverhalten sind bestimmt durch die Marktstrukturen, die Technologieverfügbarkeit, technologische Entwicklungen, die Infrastrukturdichte und den regulatorischen Rahmen. Unter Marktstruktur wird dabei der wirksame Wettbewerb verstanden. Generell ist das Transportgewerbe gekennzeichnet durch einen harten wirtschaftlichen Wettbewerb [71]. Dabei sind Flottenbetreiber konfrontiert mit instabilen und unkalkulierbaren Kraftstoffkosten, globaler Rezession sowie einem zunehmenden Kundenwunsch nach einer CO₂-armen Lieferkette [72]. Unter Technologieverfügbarkeit wird das Angebot an neuen Technologien verstanden. Die technologische Entwicklung umfasst den technologischen Reifegrad und die noch zu erschließenden Potentiale. Die Infrastrukturdichte beschreibt zum einen die Netzabdeckung installierter Lade- bzw. Betankungseinheiten, zum anderen die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und damit die Größe eines Aftermarkts.

3 Beschreibung und Stand der Nutzfahrzeugtechnik

Im Rahmen dieses Kapitels wird die technische Ausgangsbasis für Nutzfahrzeuge mit sowohl konventionellen als auch alternativen Antriebstechnologien erarbeitet. Hierzu werden konkurrierende Antriebsstrangkonzeppte anhand von Wirkungsgradketten beschrieben und dem Stand der Technik entsprechend parametrisiert. Dies umfasst die Erhebung von gravimetrischen und volumetrischen Leistungskennwerten sowie von Komponentenwirkungsgraden einzelner Schlüsselkomponenten des Antriebsstrangs auf Basis von Produktdatenblättern verschiedener Hersteller sowie Literaturangaben. Weiterhin werden technisch relevante Merkmale zur Lebensdauer einzelner Schlüsselkomponenten angegeben. Darüber hinaus werden die Querschnittsfläche, die Leermasse, der Luft- und Rollwiderstandsbeiwert je Fahrzeugsegment definiert. Die erarbeitete Parametrisierung stellt den, der Arbeit zugrunde liegende Stand der Technik dar und ist die Ausgangsbasis zur Ermittlung der antriebsstrangspezifischen Volumina (siehe Kapitel 4.2), der antriebsstrangspezifischen Simulationsmassen (siehe Kapitel 4.2) und der aktuellen sowie zukünftigen Streckenverbräuche (siehe Kapitel 4.3 und Kapitel 5.3).

Im Folgenden werden nun die zugrunde gelegten Wirkungsgradketten verschiedener Antriebsstrangkonzeppte beschrieben und die entsprechenden Basisparameter aufgeführt (siehe Kapitel 3.1). Weiterhin werden weitere relevante Parameter zur Ermittlung des Energieverbrauchs, dem Stand der Technik entsprechend, definiert (siehe Kapitel 3.2, Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4).

3.1 Antriebsstrang

3.1.1 Konventionelle Antriebsstrangkonzeppte

Für konventionelle Antriebstrangkonzeppte wird die „Tank-to-Wheel“ (TtW) Wirkungsgradkette entsprechend Gleichung (1) zugrunde gelegt.

$$\eta_{\text{TtWICE}} = \eta_{\text{eff}} \cdot \eta_G \cdot \eta_E = \frac{1}{b_e \cdot H_u} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (1)$$

Der effektive Motorwirkungsgrad η_{eff} ist abhängig vom Lastpunkt im Motorkennfeld und dem entsprechenden spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e unter Berücksichtigung des unteren Heizwertes H_u des verwendeten Kraftstoffs. Zusätzlich werden der Getriebewirkungsgrad η_G und der Wirkungsgrad des Endantriebs (Achsdifferential) η_E mit in die Betrachtung einbezogen.

Im Folgenden wird entsprechend der Schlüsselemente konventioneller Antriebstrangkonzeppte: Dieselmotor, Erdgasmotor, Nebenaggregate, Getriebe und Endantrieb sowie Speichersysteme, der Stand der Technik beschrieben und die jeweiligen Leistungskennwerte angegeben.

Dieselmotor

Aktuelle Dieselmotoren lassen sich in Abhängigkeit ihres Hubvolumens kategorisieren. Typischerweise sind Motoren mit einem Hubvolumen $\leq 2.998 \text{ cm}^3$ Nutzfahrzeugen der Klasse N_1 vorbehalten, wohingegen Motoren mit einem Hubvolumen $> 2.998 \text{ cm}^3$ ausschließlich in Nutzfahrzeugen der Klassen N_2 und N_3 vorzufinden sind [63]. Gründe hierfür sind zum einen der hohe erforderliche Drehmoment- bzw. Leistungsbedarf innerhalb der Fahrzeugklassen N_2 , N_3 und zum anderen unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Motorkosten, Kraftstoffverbrauch und Zuverlässigkeit [57].

Basierend auf einer Analyse technischer Daten und charakteristischer Kenngrößen von Dieselmotoren wurde der Stand der Technik ermittelt. Dabei entspricht die Verwendung einer zweifach oben liegenden Nockenwelle (DOHC), einem Common-Rail System mit zylinderselektiver Kraftstoffbeimischung und Einspritzdrücken bis 2.200 bar sowie einem Verdichtungsverhältnis von ca. 17:1 dem Stand der Technik. Weiterhin verfügt der Motor über eine einstufige Abgasturboaufladung mit variabler Turbinengeometrie (VTG) und einer Ladeluftkühlung (LLK). Die Einhaltung der geltenden Abgasnorm EUR VI erfordert eine gekühlte Abgasrückführung sowie weitere Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung. Dabei ist der Einsatz eines Dieseloxydationskatalysators (DOC), eines Dieselpartikelfilters (DPF), der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) und eines Ammoniak-Schlupfkatalysators (ASC) Stand der Technik. In

Abhängigkeit des realisierten Hubvolumens und unter Berücksichtigung eines unteren Heizwertes in Höhe von 11.86 kWh/kg (B7) [73] ist der effektive Motorwirkungsgrad η_{eff} im Bestpunkt 42 % ($\leq 2.998 \text{ cm}^3$) bzw. 44 % ($> 2.998 \text{ cm}^3$). Tabelle 3.1 beinhaltet die erhobenen Attribute für die der Arbeit zugrunde liegenden Dieselmotoren.

Tabelle 3.1: Attribute der Dieselmotoren			
		Motoren $\leq 2.998 \text{ cm}^3$ Hubvolumen	Motoren $> 2.998 \text{ cm}^3$ Hubvolumen
grav. Leistungsdichte	kW/kg	0,44 ^{a)}	0,29 ^{b)}
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	319 ^{a)}	194 ^{b)}
$\eta_{\text{eff,VL}}$ (70-100% rel. Last); b_e	%; g/kWh	42; 200	44; 190
$\eta_{\text{eff,HL}}$ (45-70% rel. Last); b_e	%; g/kWh	39; 215	41; 205
$\eta_{\text{eff,OTL}}$ (15-45% rel. Last); b_e	%; g/kWh	32; 260	38; 220
$\eta_{\text{eff,UTL}}$ (0-15% rel. Last); b_e	%; g/kWh	28; 300	34; 245

^{a)}Anzahl an betrachteten Motoren: 6, R4, 1.461cm³-2.998cm³ Hubraum, 55-129 kW, EUR V und EUR VI; ^{b)}Anzahl an betrachteten Motoren: 23, R4-R6, 4.485cm³-15.600cm³ Hubraum, 110-460 kW, EUR VI; VL: Volllast, HL: Halblast, OTL: obere Teillast, UTL: untere Teillast

Quellen: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.1, ergänzt um Angaben aus [74], [75]

Die Aufteilung der Motorkennfelder in die verschiedenen Lastbereiche: UTL - untere Teillast (0-15 % rel. Last), OTL - obere Teillast (15-45 % rel. Last), HL - Halblast (45-70 %) und VL - Volllast (70-100 %), stellt eine vereinfachte Abbildung des Motor-Verbrauchskennfeldes dar. Dies ermöglicht die Berücksichtigung des grundsätzlichen Zusammenhangs zwischen Lastanforderung (Betriebspunkt) und spezifischem Kraftstoffverbrauch im Rahmen der Ermittlung des Energieverbrauchs (siehe Kapitel 4.3).

Erdgasmotor

Basierend auf der Analyse technischer Daten und charakteristischer Kenngrößen von Erdgasmotoren entspricht das stöchiometrische Prinzip in monovalenter Betriebsart mit einer einfach oben liegenden Nockenwelle (SOHC) und Kerzenzündung dem Stand der Technik. Dabei wird der Kraftstoff mittels zylinderselektiver Kraftstoffbeimischung in das Saugrohr eingedüst. Die Verdichtung erfolgt in einem Verdichtungsverhältnis von ca. 12:1 und die Einspritzung erfolgt bei einem Druck von ca. 9 bar. Weiterhin verfügen die aktuellen Motoren über eine einstufige Abgasturboaufladung

mit einer Bypass-Laderegulierung sowie einer Ladeluftkühlung zur Erhöhung der zugeführten Luftmasse. Eine Abgasrückführung ist nicht realisiert. Zur Erreichung der geltenden Abgasnorm EUR VI wird ein Dreiwegekatalysator eingesetzt. Tabelle 3.2 beinhaltet die technischen Attribute für die der Arbeit zugrunde liegenden Erdgasmotoren. Aufgrund der lückenhaften Datenlage bezüglich der Verbrauchskennfelder von Erdgasmotoren, werden zur Ermittlung der effektiven Wirkungsgrade die spezifischen Verbräuche der Dieselmotoren herangezogen. Unter Berücksichtigung eines unteren Heizwertes H_u in Höhe von 12,53 kWh/kg [73] ist der effektive Wirkungsgrad von Motoren $\leq 2.998 \text{ cm}^3$ Hubvolumen im Bestpunkt etwa 40 %. Für Motoren mit einem Hubvolumen $> 2.998 \text{ cm}^3$ ist der effektive Wirkungsgrad im Bestpunkt etwa 42 %.

Tabelle 3.2: Attribute der Erdgasmotoren			
		Motoren $\leq 2.998 \text{ cm}^3$ Hubvolumen	Motoren $> 2.998 \text{ cm}^3$ Hub- volumen
grav. Leistungsdichte	kW/kg	0,38 ^{a)}	0,28 ^{b)}
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	258 ^{a)}	216 ^{b)}
$\eta_{\text{eff,VL}}$ (80-100% rel. Last); b_e	%; g/kWh	40; 200	42; 190
$\eta_{\text{eff,HL}}$ (45-80% rel. Last); b_e	%; g/kWh	37; 215	39; 205
$\eta_{\text{eff,OTL}}$ (20-45% rel. Last); b_e	%; g/kWh	31; 260	36; 220
$\eta_{\text{eff,UTL}}$ (0-20% rel. Last); b_e	%; g/kWh	27; 300	33; 245

^{a)}Anzahl an betrachteten Motoren: 1, R4, 2.998cm³ Hubraum, 100 kW, EUR VI; ^{b)}Anzahl an betrachteten Motoren: 7, R4-R6, 5.900cm³-12.800cm³ Hubraum, 147-338 kW, EEV-EUR V-EUR VI; VL: Vollast, HL: Halblast, OTL: obere Teillast, UTL: untere Teillast

Quelle: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.2

Getriebe und Endantrieb

Die vom Prinzip bedingten Nachteile des Hubkolbenmotors, die Begrenzung des Drehzahlbereichs (Leerlaufdrehzahl bis Maximaldrehzahl) sowie das geringe Drehmoment bei Anfahrvorgängen, erfordern den Einsatz von Getrieben. Getriebe ermöglichen, zusammen mit einem Anfaherelement und unter Berücksichtigung des Endantriebs, die Anpassung des Zugkraftangebots an den Zugkraftbedarf. In Anlehnung an [17], [18], [59] ist der Einsatz von manuellen Synchrongetrieben (MT) unterschiedlicher Gangzahlen Stand der Technik in den Fahrzeugklassen N₁ und N₂. Mit 60 %

Marktanteil dominieren automatisierte Getriebe (AMT) in der Fahrzeugklasse N₃ [76]. Der Übertragungswirkungsgrad von mechanischen Fahrzeuggetrieben wird in der Literatur zwischen 90 % und 97 % (Median: 94 %) angegeben. Der Endantriebswirkungsgrad variiert zwischen 90 % und 99,8% (Median: 95 %) [25], [59]. Für die Basisconfiguration wird der jeweilige Median verwendet. Die Getriebemasse (nass; inklusive Schmierstoffe) in kg und das Bauvolumen des Getriebes in m^3 sind jeweils abhängig von dem an der Getriebeeingangswelle zur Verfügung stehenden Drehmoment M . Diese werden fahrzeugsegmentindividuell in Anlehnung an das Getriebeportfolio der ZF Friedrichshafen AG, einem weltweit führenden Technologiekonzern in der Antriebs- und Fahrwerkstechnik, bestimmt [77].

Speichersysteme

Tanksysteme zur Speicherung des Dieselmotorkraftstoffs werden aus Stahl, Aluminium oder Kunststoff gefertigt. Auf Basis einer Analyse verschiedener Speichersysteme und Literaturangaben wurden charakteristische Kenngrößen von Speichersystemen, jeweils bezogen auf den leeren Speicherbehälter, bestimmt. Die volumetrische Speicherdichte beträgt $895 \text{ l}_{\text{Kraftstoff}}/\text{m}^3_{\text{Speicher}}$. Die gravimetrische Speicherdichte beträgt $5,8 \text{ l}_{\text{Kraftstoff}}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$. Die Speicherung von Erdgas in der automobilen Anwendung erfolgt entweder gasförmig in Hochdruckzylindern bei einem Druck von 200 bar oder flüssig bei einem Druck von 1 bar. Einfache Metallbehälter eignen sich nur zur Speicherung von Gasen bei geringem Druck. Bei einem Druck von 200 bar sind Faserwicklungen erforderlich, um die erforderliche Festigkeit zu gewährleisten [78]. Speicherbehälter (überwiegend Tanks vom Typ IV: Plastik-Liner, vollständig mit Kohlefasern verstärkt) für komprimiertes Erdgas (CNG) bei 200 bar besitzen im Mittel eine volumetrische Speicherdichte von ca. $108 \text{ kg}_{\text{Kraftstoff}}/\text{m}^3_{\text{Speicher}}$. Der Massenanteil des Speichers liegt bei ca. $0,26 \text{ kg}_{\text{Kraftstoff}}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$. Flüssiggasspeicher (LNG) besitzen eine mittlere volumetrische Speicherdichte von ca. $274 \text{ kg}_{\text{Kraftstoff}}/\text{m}^3_{\text{Speicher}}$ bei einem Massenanteil des Speichers von ca. $0,72 \text{ kg}_{\text{Kraftstoff}}/\text{kg}_{\text{Speicher}}$ (siehe hierzu Anhang B, Tabelle B.3 und Tabelle B.4).

3.1.2 Elektrifizierte Antriebsstrangkonzeppte

Alternative Antriebskonzepte werden in Abhängigkeit des Elektrifizierungsgrades und der jeweiligen Funktionalität (Betriebsmodi) unterschieden: Mikro-Hybride erlauben die Abschaltung des Motors im Stand, sodass der Leerlaufverbrauch des Hubkolbenmotors reduziert wird (Funktionalität: Start-Stopp). Der eingesetzte Startergenerator erlaubt darüber hinaus eine geringfügige Nutzung der Bremsenergie des Motors im Schubbetrieb (Funktionalität: Rekuperation) [79]. Mild-Hybride „*Mild Hybrid Electric Vehicle*“ (MHEV) sind gekennzeichnet durch eine höhere elektrische Leistung und die Positionierung der elektrischen Maschine innerhalb der Wandlerglocke des Getriebes [59], [79]. Mögliche Betriebsmodi sind: Start-Stopp, Rekuperation, Boost und Lastpunktverschiebung. Als Vollhybrid „*Full Hybrid Electric Vehicle*“ (FHEV) wird ein Fahrzeugkonzept mit einer weiteren Steigerung der elektrischen Leistungsfähigkeit in dem Maße verstanden, sodass neben den Funktionalitäten des MHEV auch zusätzlich ein rein elektrischer Fahrbetrieb möglich ist (in der Regel auf Distanzen unter 10 km Länge). Ist das Fahrzeug zusätzlich mit einer externen Ladevorrichtung ausgestattet und ermöglicht aufgrund eines größeren Batteriespeichers rein elektrische Reichweiten von mehr als 10 km, so wird die Bezeichnung „*Plug-In Hybrid Electric Vehicle*“ (PHEV) verwendet [79]. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Steigerung der elektrischen Leistung in Abhängigkeit der Fahrzeugklassen (N_1 , N_2 und N_3) verschiedene Spannungsebenen erfordern [80]. Weiterhin werden entsprechend der Anordnung²⁰ und Verschaltung²¹ der Antriebsstrangkomponenten verschiedene Konzepte unterschieden [81]. Die Systemarchitektur von MHEV-, FHEV- und PHEV-Konzepten entspricht überwiegend der parallelen Auslegung der Energieflüsse, wobei die elektrische Maschine am Getriebeeingang positioniert ist und mittels einer Kupplung vom Verbrennungsmotor entkoppelt werden kann (P2-Konfiguration). In Abhängigkeit der Betriebsmodi „*Charge Sustaining*“ (CS) (verbrennungsmotorischer Betrieb) und „*Charge Depleting*“ (CD) (rein batterieelektrischer Betrieb) sind verschiedene Wirkungs-

²⁰ Position der elektrischen Maschine in Relation zum Verbrennungsmotor

²¹ P1-, P2- und P3-Konzepte ermöglichen eine Momentenaddition, wohingegen P4-Konzepte eine Zugkraftaddition ermöglichen.

gradketten zu berücksichtigen. Im Falle des verbrennungsmotorischen Betriebs wird für die alternativen Antriebskonzepte MHEV, FHEV und PHEV_{CS} die TtW-Wirkungsgradkette entsprechend der Gleichung (2) zugrunde gelegt. Diese alternativen Antriebskonzepte erfahren eine Elektrifizierung des konventionellen Antriebsstrangs, weshalb die zugrunde liegende Wirkungsgradkette der des konventionellen Antriebsstrangs gleicht. Um den Einfluss der Betriebsmodi, Start-Stopp und Bremsenergierekuperation zu berücksichtigen, wird zusätzlich zum effektiven Motorwirkungsgrad η_{eff} , dem Getriebewirkungsgrad η_G und dem Wirkungsgrad des Endantriebs η_E ein Hybridisierungsfaktor η_{HF} berücksichtigt. Dieser bildet die Erhöhung des TtW-Wirkungsgrades ab, welche durch die Funktionalität der Integration zusätzlicher Energiewandler und Speicher erreicht wird. Der Hybridisierungsfaktor η_{HF} variiert in Abhängigkeit der Fahrzeugsegmente, der eingesetzten elektrischen Maschine, des zugrunde gelegten Fahrprofils sowie der entsprechenden Betriebsstrategie.

$$\eta_{\text{TtW}_{\text{MHEV/FHEV/PHEV}_{\text{CS}}}} = \eta_{\text{eff}} \cdot \eta_{\text{HF}} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (2)$$

Im Falle des rein batterieelektrischen Betriebs ist der mittlere energetische Wirkungsgrad des Batteriesystems η_{BS} , der mittlere Wirkungsgrad der Leistungselektronik η_{LE} , der mittlere Wirkungsgrad der elektrischen Maschine η_{EM} sowie die Wirkungsgrade des Getriebes und Endantriebs, siehe Gleichung (3), zu berücksichtigen.

$$\eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{CD}}}} = \eta_{\text{BS}} \cdot \eta_{\text{LE}} \cdot \eta_{\text{EM}} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (3)$$

In Abhängigkeit des rein elektrischen Fahranteils²² EF in Prozent ergibt sich der kombinierte TtW-Wirkungsgrad zu:

$$\eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{kombiniert}}}} = (1 - EF) \cdot \eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{CS}}}} + EF \cdot \eta_{\text{TtW}_{\text{PHEV}_{\text{CD}}}} \quad (4)$$

Fahrzeugen mit einer externen Ladevorrichtung und einem Aggregat zur Reichweitenverlängerung, sogenannte „Range Extended Electric Vehicles“ (REEV), liegt eine serielle Systemarchitektur zugrunde. Im Falle des Fahrbetriebs mit Range-Extender (Be-

²² Im elektrischen CD-Modus zurückgelegter Fahranteil der jährlichen Gesamtfahrstrecke.

triebsmodus REB) erfolgt eine mehrfache Energiewandlung bedingt durch die zugrunde liegende serielle Architektur des Antriebsstrangs (siehe Gleichung (5)).

$$\eta_{TtW_{REEV_{REB}}} = \eta_{RE_{ICE/FC}} \cdot \eta_{BS} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (5)$$

Als Aggregate zur Reichweitenverlängerung werden derzeit Hubkolbenmotoren oder Brennstoffzellensysteme eingesetzt. Im Falle eines Hubkolbenmotors als Aggregat zur Reichweitenverlängerung gilt $\eta_{RE_{ICE}} = \eta_{eff} \cdot \eta_{EM1} \cdot \eta_{LE1}$. Dabei wird der mittlere effektive Wirkungsgrad des Motors η_{eff} , der mittlere Wirkungsgrad der elektrischen Maschine im Generatorbetrieb η_{EM1} sowie der mittlere Wirkungsgrad der zusätzlich benötigten Leistungselektronik η_{LE1} berücksichtigt. Im Falle eines Brennstoffzellensystems wird der mittlere elektrische Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems $\eta_{FC_{el}}$ und der mittlere Wirkungsgrad der zusätzlichen Leistungselektronik η_{LE1} berücksichtigt. Somit gilt $\eta_{RE_{FC}} = \eta_{FC_{el}} \cdot \eta_{LE1}$. Unabhängig vom gewählten Aggregat zur Reichweitenverlängerung werden der mittlere energetische Wirkungsgrad des Batteriesystems, der mittlere Wirkungsgrad der Leistungselektronik, der mittlere Wirkungsgrad der elektrischen Maschine, ein Faktor ausschließlich zur Berücksichtigung des Potentials zur Bremsenergieerückgewinnung η_{Re} sowie die Wirkungsgrade des Getriebes und Endantriebs berücksichtigt. Im Falle des Fahrbetriebs ohne Range-Extender erfolgt ein rein batterieelektrischer Fahrbetrieb und gleicht der Wirkungsgradkette des rein batterieelektrischen Konzeptes „*Battery Electric Vehicle*“ (BEV) (siehe Gleichung (6)).

$$\eta_{TtW_{BEV/REEV}} = \eta_{BS} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{Re} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (6)$$

Der kombinierte TtW-Wirkungsgrad ergibt sich in Abhängigkeit des Fahranteils im Betriebsmodus REB in Prozent nach Gleichung (7).

$$\eta_{TtW_{REEV_{kombiniert}}} = REB \cdot \eta_{TtW_{REEV_{REB}}} + (1 - REB) \cdot \eta_{TtW_{REEV}} \quad (7)$$

Die zugrunde liegende Wirkungsgradkette des brennstoffzellenelektrischen Antriebsstrangkzeptes „*Fuel Cell Electric Vehicle*“ (FCEV) entspricht Gleichung (8).

$$\eta_{TtW_{FCEV}} = \eta_{FC_{el}} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{Re} \cdot \eta_G \cdot \eta_E \quad (8)$$

Im Folgenden wird entsprechend der Schlüsselemente elektrifizierter Antriebsstrangkonzeppte: Batteriesystem, Leistungselektronik, elektrische Maschine, Brennstoffzellensystem sowie Getriebe und Endantrieb, der Stand der Technik beschrieben und jeweilige Leistungskennwerte angegeben.

Batteriesystem²³

Derzeitige Schlüsseltechnologie hinsichtlich aktueller elektrochemischer Speichersysteme in der mobilen Anwendung ist die Lithium-Ionen Technologie, da entsprechend der verwendeten Zellchemie und Auslegung sowohl hohe Energiedichten als auch hohe Leistungsdichten erzielbar sind [82], [83]. Als Anodenmaterial zur Interkalation bzw. Deinterkalation der Lithium-Ionen dient Kohlenstoff. Als Kathodenmaterial stehen, in Abhängigkeit der gewünschten Eigenschaften des Akkumulators, eine Reihe von Lithium-Übergangsmetall-Verbindungen zur Verfügung. Wird das Batteriesystem als Hochenergiertyp bezeichnet, entspricht das Verhältnis von erforderlicher Leistung zur gespeicherten Energiemenge (P/E) kleiner $10 \frac{1}{h}$. Ist dieses Verhältnis größer als $10 \frac{1}{h}$ so wird die Bezeichnung Hochleistungstyp verwendet [83].

Tabelle 3.3 beinhaltet die Attribute bezogen auf Lithium-Ionen Batteriesysteme, erhoben aus verfügbaren Datenblättern und Literaturquellen. Der Begriff „*Batteriesystem*“ umfasst die Zelle, die einzelnen Batteriemodule, den Batterietrog, die thermische Isolation, Anschlüsse und Verbinder des Thermomanagements, elektrische Verbinder, die Hauptschützbox, die Hochspannungsverbindung, das Batteriemanagementsystem (BMS) und die Safety Control Unit (SCU) [84]. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Fahrzeugtechnik, maßgeblich beeinflusst durch die Art des Fahrzeuges und den jeweiligen Einsatzbereich, wurden verschiedene Systeme mit differierenden Kenngrößen hinsichtlich Kapazität (Ah), Spannung (V) und Lade- bzw. Entladeströmen (A) betrachtet. Im Vergleich der Batteriesystemtypen Hochenergie und

²³ Die Begriffe Akkumulator und Batterie werden synonym verwendet und bezeichnen einen wiederaufladbaren Speicher auf elektrochemischer Basis.

Hochleistung zeigt sich der Auslegungsschwerpunkt zur Erfüllung der jeweiligen Anforderungen. Die gravimetrische Leistungsdichte eines Lithium-Ionen Hochleistungsbatteriesystems ist um den Faktor 3,7 höher im Vergleich zu einem Lithium-Ionen Hochenergiebatteriesystem, wohingegen die gravimetrische Energiedichte um den Faktor 2,1 und somit circa um die Hälfte geringer ist.

Tabelle 3.3: Attribute von Lithium-Ionen Batteriesystemen				
		Hochenergietyp	Hochleistungstyp	
grav. Leistungsdichte	kW/kg	0,281 ^{a)}	1,05 ^{b)}	
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	375 ^{a)}	1.092 ^{b)}	
grav. Energiedichte	kWh/kg	0,091 ^{a)}	0,044 ^{b)}	
vol. Energiedichte	kWh/m ³	141 ^{a)}	44 ^{b)}	
Zyklenzahl	-	3.100	25.000	
Wirkungsgrad η_{BS}	-	0,90 ^{c)}		
^{a)} Anzahl an betrachteten Systemen: 29, Anzahl an betrachteten Literaturangaben: 11, Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide (NMC) Technologie; ^{b)} Anzahl an betrachteten Systemen: 1, Anzahl an betrachteten Literaturangaben: 6, Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide (NCA), Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxide (NMC) und Lithium-Eisenphosphat (LiFePO ₄) Technologie; ^{c)} energetischer Wirkungsgrad				
Quellen: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.5, ergänzt um Angaben aus [85], [86]				

An Batteriesysteme vom Hochleistungstyp werden hohe Anforderungen hinsichtlich einer temporär hohen Leistungsab- und -aufnahme gestellt. Der Betriebspunkt eines Hochleistungsbatteriesystems erstreckt sich über einen geringen Ladezustandsbereich (SOC) von ca. 50 % bis 60 %. Unter Berücksichtigung eines mittleren SOC von 55 % entspricht dies einer Entladetiefe (DOD) von 45 %. Der Ladezustandsbereich ist dadurch begründet, dass kurzzeitig sowohl hohe Entladeleistungen (evtl. für Beschleunigungsvorgänge) als auch hohe Leistungsaufnahmen (evtl. aufgrund hoher Rekuperationsleistungen) auftreten und gewährleistet werden können. Der damit einhergehende positive Effekt ist die Vermeidung von Tiefenentladung und die Erreichung einer hohen Zyklenzahl [87]. Im Gegensatz dazu werden Lithium-Ionen Batteriesysteme des Hochenergietyps bis zu einem SOC von ca. 20 % entladen, was einem DOD von ca. 80 % entspricht. Aufgrund der hohen Ladehöhe ist die Zyklenzahl dieser Batteriesysteme geringer im Vergleich zu Batteriesystemen des Hochleistungstyps

[86]. Der Innenwiderstand des Batteriesystems ist für den energetischen Wirkungsgrad die ausschlaggebende Größe. Dieser berücksichtigt sowohl Spannungs- als auch thermische Verluste und ist als Quotient aus entnommener und eingeladener Energie definiert. Bei Temperaturen über 20°C und geringen Entladeströmen (C-Koeffizienten²⁴ unterhalb von 0,4 C) sind energetische Wirkungsgrade bis zu 97 % möglich, wohingegen bei geringen Temperaturen (<5°C) und steigenden Entladeströmen (C-Koeffizient >1,2 C) dieser auf ca. 83 % absinkt [88]. Unter der Voraussetzung eines aktiven Thermomanagements des Batteriesystems zur Erhaltung von Temperaturen >20°C bei Lade- und Entladeraten bis 3 C, wird typunabhängig von einem mittleren energetischen Wirkungsgrad des Batteriesystems η_{BS} von 90 % ausgegangen.

Leistungselektronik

Die Aufgabe der Leistungselektronik, als Verbindungsglied zwischen Energiequelle (z.B. Batteriesystem, Brennstoffzellensystem) und -senke (z.B. Nebenverbraucher, elektrische Maschine), ist die bidirektionale Anpassung der ausgangsseitigen Spannungen bei geringen Verlusten. Durch periodisches Schalten von Halbleiterelementen können sowohl Gleich- (DC) als auch Wechsel- (AC) Spannungsformen erzeugt und je nach Anwendung die entsprechende Drehzahl bzw. das gewünschte Drehmoment von elektrischen Maschinen oder die DC-Ausgangsspannung eines Wandlers geregelt werden. Während der Schaltvorgänge wird elektrische Energie in Wärme umgewandelt, was abhängig vom Spannungsabfall und dem zu schaltenden Strom eine aktive Kühlung der verwendeten Leistungselektronik bedingt. Unter der Vielzahl von möglichen Leistungshalbleitern hat sich der „*Insulated Gate Bipolar-Transistor*“ (IGBT) herauskristallisiert, da dieser für die bei Nutzfahrzeugen maximal geforderten Gleichstromspannungen bis 800 V und maximalen Ströme bis zu 450 A geeignet ist [80], [89]. Dies entspricht einer realisierbaren elektrischen Leistung von bis zu 360 kW.

²⁴ Der C-Koeffizient setzt den Lade- bzw. Entladestrom ins Verhältnis zur maximalen Batteriekapazität. So bedeutet ein Koeffizient von 1 C, dass eine Batterie innerhalb von 1 Stunde komplett ge- oder entladen ist. Ist der C-Koeffizient <1 C, würde es länger als 1 Stunde dauern. Bei einem C-Koeffizient >1 C, würde es weniger als 1 Stunde andauern.

Tabelle 3.4 beinhaltet gemittelte Kenngrößen leistungselektronischer Elemente. Dabei wurden charakteristische Kenngrößen der leistungsführenden Elemente, nämlich des Inverters und des bidirektionalen Gleichspannungswandlers, analysiert.

Tabelle 3.4: Attribute von Inverter und Gleichspannungswandler		
grav. Leistungsdichte	kW/kg	4,0 ^{a)}
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	3.825 ^{a)}
Wirkungsgrad η_{LE}	%	0,97 ^{a)}
Lebensdauer	h	10.000
^{a)} Anzahl an betrachteten Systemen: 20, Spannung 42-900 V, Nennstrom Ausgang 100-450 A		
Quellen: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.6, ergänzt um Angaben aus [90]		

Elektrische Maschine

Elektrische Maschinen ermöglichen eine bidirektionale Energiewandlung über einen Luftspalt, die entweder elektrisch-mechanisch oder mechanisch-elektrisch ist. Über den Stator wird elektrische Leistung zu- bzw. abgeführt, wohingegen über den Rotor mechanische Leistung ab- bzw. zugeführt wird. Da der charakteristische Drehmomentverlauf über die Drehzahl einer elektrischen Maschine nahezu ideal den Drehmomentanforderungen an den Antriebsrädern von Kraftfahrzeugen (Zugkrafthyperbel) entspricht, ist eine Anfahrkupplung nicht erforderlich und es kann in Abhängigkeit der Drehmomentanforderung auf zusätzliche Übersetzungsstufen verzichtet werden.

Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen haben sich 3-Phasen-Wechselstrom, auch Drehstrommaschinen genannt, durchgesetzt [75], [91]–[93]. Drehstrommaschinen sind aufgrund hoher Leistungs- bzw. Momentendichten, ihres hohen Wirkungsgrades und geringer Wartungskosten für den Traktionsbetrieb besonders geeignet [89], [92]. Die derzeit dominierende Bauart zur Integration in den elektrifizierten Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen ist, neben der Asynchronmaschine (ASM), die permanenterregte Synchronmaschine (PSM) [94].

Auf Basis einer Analyse verfügbarer Datenblätter von flüssiggekühlten Drehstrommaschinen wurden technische Attribute, unterschieden nach PSM und ASM, erhoben. Darüber hinaus wurden diese um Literaturwerte ergänzt (siehe hierzu Tabelle 3.5). Vorteile der PSM gegenüber der ASM sind die höheren gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichten. Prinzipbedingt werden unterschiedliche Wirkungsgrade innerhalb verschiedenen Drehzahl- und Drehmomentbereiche erreicht. Im Bestpunkt werden Wirkungsgrade von mehr als 93 % erreicht.

Tabelle 3.5: Attribute von Asynchron- und permanenterregten Synchronmaschinen			
		PSM	ASM
grav. Leistungsdichte	kW/kg	1,41 ^{a)}	0,68 ^{b)}
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	3.704 ^{a)}	2.978 ^{b)}
$\eta_{EM_Lastbereich\ 1}$	%	94 ^{a)}	93 ^{b)}
$\eta_{EM_Lastbereich\ 2\ (K_1 \cdot \eta_{EM1})}$	%	91 ($K_1=0,97$)	90 ($K_1=0,97$)
$\eta_{EM_Lastbereich\ 3\ (K_2 \cdot \eta_{EM1})}$	%	86 ($K_2=0,91$)	82 ($K_2=0,88$)
$\eta_{EM_Lastbereich\ 4\ (K_3 \cdot \eta_{EM1})}$	%	60 ($K_3=0,64$)	54 ($K_3=0,58$)
Lebensdauer	h	10.000	

K_1 bis K_3 entsprechen Korrekturfaktoren zur beliebigen Skalierung der Wirkungsgrade verschiedener Drehzahl- und Drehmomentbereiche, wobei gilt $K_3 \leq K_2 \leq K_1 \leq 1$; ^{a)}Anzahl an betrachteten EM: 4, Nennleistung: 100-150 kW, Nenndrehmoment: 350-450 Nm; ^{b)}Anzahl an betrachteten EM: 8, Nennleistung: 50-120 kW, Nenndrehmoment: 85-815 Nm

Quellen: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.7, ergänzt um Angaben aus [75], [90]

Die Aufteilung des Kennfeldes von elektrischen Maschinen in verschiedene Lastbereiche ermöglicht die Berücksichtigung des grundsätzlichen Zusammenhangs zwischen Lastanforderung (Betriebspunkt) und spezifischem Wirkungsgrad im Rahmen der Bestimmung des Energieverbrauchs (siehe Kapitel 4.3). Die Antriebsstrangintegration der elektrischen Maschine kann im Rahmen verschiedener Motorkonzepte, nämlich Zentralmotorkonzept, radnahes Motorkonzept oder radnabenintegriertes Motorkonzept, erfolgen. Für die weiteren Analysen wird von einem Zentralmotorkonzept mit einer permanenterregten Synchronmaschine ausgegangen.

Getriebe und Endantrieb

Anforderungen an Nutzfahrzeuge der Fahrzeugklassen N_1 , N_2 und N_3 sind sehr umfangreich, was sich z.B. in der großen Bandbreite an erforderlichen Drehmomenten von Hubkolbenmotoren (siehe Tabelle 2.4 auf Seite 16) widerspiegelt. Die Auswertung der Datenblätter von Drehstrommaschinen in der Leistungsklasse über 100 kW zeigte, dass das realisierte Drehmoment im Mittel 400 Nm beträgt.

Üblicherweise wird bei hybridelektrischen Fahrzeugkonzepten (HEV, FHEV, PHEV) die elektrische Maschine in die Wandlerglocke integriert (Zentralmotorkonzept) und das ursprüngliche Getriebe beibehalten. Rein elektrische Fahrzeugkonzepte (BEV, REEV, FCEV) der Fahrzeugklasse N_1 benötigen bei entsprechender Endübersetzung nicht zwingendermaßen ein zusätzliches Getriebe, wohingegen bei Fahrzeugen der Klasse N_2 und N_3 ein Getriebe erforderlich ist, um den Drehmomentanforderungen gerecht zu werden. Aktuelle batterieelektrische Fahrzeugkonzepte der Klasse N_3 z.B. von den Firmen E-FORCE ONE AG oder FRAMO GmbH verwenden ein Summiergetriebe mit einstufiger Übersetzung. Aufgrund mangelnder Datenblätter wird die Getriebemasse für rein elektrische Fahrzeugkonzepte mit 70 kg und das entsprechende Getriebevolumen mit $0,05 \text{ m}^3$ abgeschätzt sowie der derzeitige Wirkungsgrad von Getriebe und Endantrieb in Höhe von 94% bzw. 95% (siehe Kapitel 3.1.1) übernommen.

Brennstoffzellensystem

Das Brennstoffzellensystem ist ein elektrochemischer Energiewandler, in dem eine isotherme und isobare chemische Verbrennungsreaktion (Redoxreaktion) kontrolliert stattfindet, welche die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie und Wärme umsetzt. In Bezug auf mobile Anwendungen hat sich die Niedertemperatur-Polymerelektrolyt-Membranbrennstoffzelle (NT-PEM) als am geeignetsten erwiesen [95]–[99]. Die zugrunde liegende Systemdefinition umfasst den Brennstoffzellenstack, das Luftversorgungssystem einschließlich Befeuchter-Einheit, das Wasserstoffversorgungsmodul und Komponenten zur Steuerung und Überwachung des Systems.

Der elektrische Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems $\eta_{FC_{el}}$ ist abhängig vom Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks $\eta_{FC-Stack}$ und der erforderlichen Leistung der „Ballance of Plant“ (BoP) Komponenten P_{BoP} (siehe Gleichung (9)). Die BoP-Komponenten stellen die Versorgung der Brennstoffzelle mit den erforderlichen Substanzen sicher, sowie überwachen und steuern sie das System. Je größer das Verhältnis von der Leistung der BoP-Komponenten im Verhältnis zur Leistung des Brennstoffzellensystems $P_{FC-System}$ desto geringer wird der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems. Dieser Zusammenhang wird mittels des BoB-Faktors η_{BoP} beschrieben.

$$\eta_{FC_{el}} = \eta_{FC-Stack} \cdot \eta_{BoP} = \eta_{FC-Stack} \cdot \left(1 - \frac{P_{BoP}}{P_{FC-System}}\right) \quad (9)$$

Der Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks ergibt sich unter Berücksichtigung des elektrochemischen Wirkungsgrades η_{elch} , der Wasserstoffumsetzungsrate, auch Stromwirkungsgrad η_i genannt, und dem Spannungswirkungsgrad η_U (siehe Gleichung (10)). Da typische Betriebsspannungen einer Einzelzelle U_{real} im Bereich von ca. 0,50 V und 0,85 V liegen, besteht der Brennstoffzellenstack aus mehreren hundert Einzelzellen, die elektrisch in Serie geschaltet sind, um den Spannungsanforderungen in Kraftfahrzeugen zu entsprechen [97].

$$\eta_{FC-Stack} = \eta_{elch} \cdot \eta_i \cdot \eta_U \approx 0,83 \cdot 0,99 \cdot \frac{U_{real}}{1,23} \quad (10)$$

Bei hohen Systemleistungen verringert sich der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems aufgrund eines charakteristischen Spannungsverlaufs. Daher wird der Brennstoffzellenantriebsstrang hybridisiert, sodass das Brennstoffzellensystem vorwiegend in höheren Wirkungsgradbereichen betrieben werden kann. Darüber hinaus wird die Dynamik des Systems mittels der Kopplung mit einem Batteriesystem erhöht. Dies verbessert die Kaltstartfähigkeit und ermöglicht eine Rückgewinnung von Bremsenergie [100]. Zur Erreichung höherer Leistungsanforderungen werden mehrere Systeme parallel geschaltet [78]. Tabelle 3.6 beinhaltet technische Attribute von NT-PEM Systemen auf Basis verfügbarer Produktdatenblätter. Aktuell ist der realisierte elektri-

sche Wirkungsgrad des Systems im Mittel bei 51 %. Die Lebensdauer wird überwiegend mit 10.000 Betriebsstunden angegeben.

Tabelle 3.6: Attribute von NT-PEM Systemen		
grav. Leistungsdichte	kW/kg	0,28 ^{a)}
vol. Leistungsdichte	kW/m ³	140 ^{a)}
Wirkungsgrad _{el} $\eta_{NT-PEM, System, real}$	%	51 ^{a)}
Lebensdauer	h	10.000
^{a)} Anzahl an betrachteten Systemen: 9, Nennleistung: 8-198 kW _{el}		
Quelle: eigene Analyse, siehe auch Anhang B, Tabelle B.8		

3.2 Aerodynamik

Bedingt durch die Umströmung eines Kraftfahrzeuges bildet sich am Fahrzeugkörper eine Druckverteilung aus, welche sich vom Umgebungsdruck unterscheidet. Zudem entstehen Schubspannungen an der Kraftfahrzeugoberfläche. Diese Effekte verursachen Widerstandskräfte, welche in Summe der Luftwiderstandskraft F_L nach Gleichung (11) entsprechen. Die Reibungswiderstände F_{LWR} , tragen dabei mit ca. 15 % zur Luftwiderstandskraft bei, während der Druckwiderstand F_{LWD} mit 85 % die Luftwiderstandskraft bestimmt [101].

$$F_L = F_{LWD} + F_{LWR} = \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v_{rel}^2 \quad (11)$$

Die Luftwiderstandskraft wird durch die Fahrzeugstirnfläche A , der Luftwiderstandsbeiwert c_w und die Relativgeschwindigkeit des Fahrzeugs v_{rel} bestimmt. Der Luftwiderstandsbeiwert ist dimensionslos und stellt ein Maß für die aerodynamische Güte der Kraftfahrzeugform dar.

Tabelle 3.7 gibt einen Überblick zum Stand der Technik aerodynamischer Maßnahmen bei Nutzfahrzeugen der Klassen N_2 und N_3 . Die Aerodynamik von Fahrzeugen der Klasse N_1 kann lediglich durch deren Formgebung und nicht durch die in Tabelle 3.7 aufgezeigten Maßnahmen bestimmt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass nahezu alle Maßnahmen den Bereich des Fahrerhauses betreffen. Basierend auf dem in

Tabelle 3.7 zugrunde gelegten Stand der Technik und unter Berücksichtigung der in Tabelle 2.3 aufgezeigten Bandbreiten, werden in Tabelle 3.8 die aerodynamischen Attribute der Basisfahrzeuge definiert.

Tabelle 3.7: Stand der Technik aerodynamischer Maßnahmen für Fahrzeuge der Klasse N₂ und N₃				
		N ₂	N ₃	N ₃ -SZ
Fahrerhaus	Radien am Fahrerhaus	✓	✓	✓
	Luftleitdüse	✓	✓	✓
	Optimierte Außenspiegel	✓	✓	✓
	Windleitblech bzw. -körper	✓	✓	✓
	Sonnenblende	✗	✓	✓
	Endkantenklappe	✗	✓	✓
	Frontschützenverlängerung	✗	✓	✓
	Kühlufteinlass verschließbar	✗	✓	✓
Fahrwerk	Fahrgestellseitenverkleidung	✗	✗	✓
	Unterbodenteilverkleidung	✗	✗	(✓)
Auflieger	Radien an der Aufliegerfront	-	-	✓
	Radverkleidung	-	-	✓

Quellen: eigene Darstellung nach [25], [101]

Tabelle 3.8: Aerodynamische Attribute der Basisfahrzeuge nach Fahrzeugsegmenten			
Fahrzeugsegment	Querschnittsfläche A in m ²	Luftwiderstandsbeiwert c_w	$c_w \cdot A$ in m ²
3,5t zGG	3,50	0,37	1,30
7,5t zGG	7,00	0,45	3,15
12t zGG	8,00	0,50	4,00
18t zGG	9,00	0,55	4,95
26t zGG	9,00	0,55	4,95
40t zGG	10,00	0,53	5,30

Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an Tabelle 2.3 und [25]

3.3 Fahrzeugmasse

Tabelle 3.9 beinhaltet die fahrzeugsegmentindividuellen mittleren Leermassen²⁵ der Basisfahrzeuge aufgeteilt nach Fahrzeug, Aufbau und Auflieger. Dabei wird deutlich, dass insbesondere bei Sattelzügen die Anwendung von Leichtbaustrategien nicht nur für die Zugmaschine, sondern auch für den Auflieger (mit etwa 50 % Masseanteil am Gesamtfahrzeug) als relevant erscheint.

Tabelle 3.9: Fahrzeugsegmentspezifische Leermassen					
Fahrzeugsegment	mittlere Leermasse - Fahrzeug -		mittlere Leermasse - Aufbau bzw. Auflieger -		Gesamtfahrzeug
	Masse in kg	Anteil am Gesamt- fahrzeug in %	Masse in kg	Anteil am Gesamt- fahrzeug in %	Leermasse in kg
3,5t zGG	1.850	100%	-	-	1.850
7,5t zGG	3.450	80%	855	20%	4.305
12t zGG	4.620	77%	1.400	23%	6.020
18t zGG	7.745	73%	2.880	27%	10.625
26t zGG	8.458	75%	2.880	25%	11.338
40t zGG	7.170	51%	6.982	49%	14.152

Quelle: eigene Analyse

Die Gewichtsbilanz (siehe Tabelle 3.10) der Basisfahrzeuge verdeutlicht, dass die Kategorie „Karosserie/ Kabine & Aufbau bzw. Auflieger“ mit ca. 50 % Massenanteil die Leermasse zu großen Teilen bestimmt. Der Masseanteil der Kategorie „Fahrwerk“ variiert in Abhängigkeit des Fahrzeugsegmentes. Bei leichten Fahrzeugen beträgt dieser 20 % und erhöht sich in Abhängigkeit des zulässigen Gesamtgewichts auf bis zu 30 %. Die Komponenten des Antriebsstrangs haben einen Anteil von ca. 16 % am Leergewicht. Die restlichen Massenanteile sind den Kategorien „Elektrik & Elektronik“ (ca. 4 %) und „Sonstiges“ (ca. 10 %) zuzuordnen. Fahrzeugklassenübergreifend haben Eisenwerkstoffe im Mittel einen Masseanteil von 68 %. Der Masseanteil des Leichtbauwerkstoffes Aluminium beträgt im Mittel ca. 4 % [103].

²⁵ In Anlehnung an die Straßenzulassungsverordnung entspricht die Leermasse der Masse des fahrbereiten Fahrzeuges ohne Fahrer, Passagiere oder Ladung, mit vollem Kraftstofftank und sonstigen vollen Betriebsstoff-Vorratsbehältern, mit serienmäßigem Bordwerkzeug und mit serienmäßigem Reserverad [102]. Für Fahrzeuge der Klasse N₂ und N₃ wird die Masse des fahrbereiten Fahrzeuges, als Summe des Leergewichts des fahrbereiten Fahrgestells (inkl. Fahrerhaus) und des Leergewichts des Aufbaus bzw. des Aufliegers definiert.

Tabelle 3.10: Fahrzeugsegmentspezifische Gewichtsbilanz

Fahrzeugsegment	Gesamtfahrzeug Leermasse in kg	Systemgewichte pro Kategorie in kg				
		Antriebsstrang	Elektrik & Elektronik	Fahrwerk	Karosserie/ Kabine & Aufbau bzw. Auflieger	Sonstiges
3,5t zGG	1.850	296	74	370	925	185
	100%	16%	4%	20%	50%	10%
7,5t zGG	4.305	689	86	947	2.153	431
	100%	16%	2%	22%	50%	10%
12t zGG	6.020	963	120	1.324	3.010	602
	100%	16%	2%	22%	50%	10%
18t zGG	10.625	1.700	213	2.338	5.313	1.063
	100%	16%	2%	22%	50%	10%
26t zGG	11.338	1.814	227	2.494	5.669	1.134
	100%	16%	2%	22%	50%	10%
40t zGG	14.152	1.840	283	4.246	6.368	1.415
	100%	13%	2%	30%	45%	10%

Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [17], [103], [104]

Die Angaben in Tabelle 3.10 beziehen sich ausschließlich auf konventionell mit Diesel angetriebene Nutzfahrzeugkonzepte. Angaben für elektrische Nutzfahrzeugkonzepte sind bisher nicht öffentlich verfügbar. Für diese Fahrzeuge ist allerdings von einem erhöhten Gewichtsanteil der Elektrik & Elektronik, z.B. durch die Integration von Speichersystemen und leistungselektronischer Elemente, auszugehen.

Als Grundlage der antriebsstrangspezifischen Konfiguration zur Bestimmung der Simulationsmasse, dient die Masse des Basisfahrzeuges. Diese umfasst alle nicht antriebsrelevanten Komponenten, wie das Fahrgestell, das Fahrwerk, das Interieur, das Fahrerhaus und den Aufbau bzw. Auflieger. Die Basismasse wird entsprechend der in Tabelle 3.11 aufgezeigten Berechnungssystematik fahrzeugsegmentspezifisch ermittelt. Dabei werden die im Rahmen von Kapitel 3.1.1 ermittelten Attribute einzelner Antriebsstrangkomponenten herangezogen. Für die Masseabschätzung des Abgasnachbehandlungssystems, zur Erfüllung der Norm EURO VI, wird der Kennwert in Höhe von $78,67 \text{ cm}^3/\text{kg}$ herangezogen. Dieser entspricht dem Quotienten aus dem mittleren Hubvolumen von Sattelzugmaschinen in Höhe von 11.800 cm^3 und der entspre-

chenden Masse des Abgasnachbehandlungssystems in Höhe von 150 kg, angegeben in [25].

Tabelle 3.11: Fahrzeugsegmentspezifische Massen der Basisfahrzeuge in kg

	Fahrzeugsegment					
	3,5t zGG	7,5t zGG	12t zGG	18t zGG	26t zGG	40t zGG
Leermasse des betriebsbereiten Referenzfahrzeugs	1.850	4.305	6.020	10.625	11.338	14.152
- Masse der Verbrennungskraftmaschine (nass)	233	462	579	719	901	1.147
- Masse des Getriebes (nass)	62	104	141	247	281	318
- Masse des Kraftstofftanks (leer)	14	21	20	53	67	68
- Masse des Kraftstoffs bei 100% Füllung	67	100	96	259	326	330
- Masse des Abgasnachbehandlungssystems (EURO VI)	28	62	80	127	150	150
= Masse der Basisfahrzeuge	1.446	3.555	5.104	9.220	9.613	12.138

Quelle: eigene Analyse

3.4 Reifen und Räder

Als Verbindungsglieder zwischen Achsen und Fahrbahn sollen Reifen und Räder eines Kraftfahrzeuges die Spurführung gewährleisten und den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn aufrechterhalten. In Anlehnung an § 36 StVZO sind die Räder von Kraftfahrzeugen und Anhängern mit Luftreifen zu versehen, sofern nicht andere Bereifungen (z.B. Gummireifen) zugelassen sind. Diese müssen über den vollen Umfang, sowie die volle Breite mit Profilrillen oder Einschnitten versehen sein [105]. Die Verformung des belasteten Luftreifens während des Abrollvorgangs führt zu einer kontinuierlichen Umwandlung mechanischer Energie in Wärme und begründet die dabei induzierte Rollwiderstandskraft F_R :

$$F_R = F_G \cdot f_R \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot f_R \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

Die Rollwiderstandskraft wird durch die Gewichtskraft F_G und den dimensionslosen Rollwiderstandsbeiwert f_R , sowie durch die Fahrbahnsteigung α beeinflusst.

Die Bandbreite der Rollwiderstandsbeiwerte bezüglich der Effizienzklassen A bis E sind der Tabelle 3.12 zu entnehmen. Dem Stand der Technik wird der jeweilige Mittelwert zugeordnet.

Tabelle 3.12: Rollwiderstandsbeiwerte der Basisfahrzeuge			
Fahrzeugsegment	Reifenklasse; Wertebereiche in ‰	Energieeffizienzklasse; Wertebereiche in ‰	Gemittelter Rollwiderstandsbeiwert f_R in ‰
3,5t zGG	C1; A-E; 6,5-10,5		8,50
7,5t zGG			7,35
12t zGG			
18t zGG	C3; A-E; 4,0-8,0		6,00
26t zGG			
40t zGG			
Quellen: eigene Darstellung nach [60], [61]			

3.5 Erläuterung der Anwendungszusammenhänge

Wie eingangs erwähnt, werden die im Rahmen der Kapitel 3.1 - 3.4 aufgezeigten Wirkungszusammenhänge und angegebenen Parameter an verschiedensten Stellen der Arbeit genutzt. Im Sinne eines besseren Verständnisses werden die Zusammenhänge ihrer Verwendung kurz näher erläutert.

Die erhobenen gravimetrischen und volumetrischen Leistungskennwerte je Schlüsselkomponente des Antriebsstrangs ermöglichen im Rahmen der Konfiguration des Nutzfahrzeugkonzeptes (siehe Kapitel 4.2) die antriebsstrangspezifische Bestimmung von Masse und Volumen. Dies ermöglicht im Rahmen der Bewertung alternativer Antriebskonzepte die Berücksichtigung von Einflüssen hinsichtlich der Nutzlast bzw. hinsichtlich des Nutzvolumens. Die definierten Wirkungsgradketten, die Wirkungsgradangaben einzelner Schlüsselkomponenten sowie die je Fahrzeugsegment definierten Fahrzeugparameter (Querschnittsfläche, Leermasse, Luft- und Rollwiderstandsbeiwert) entsprechen dem der Arbeit zugrunde gelegten Stand der Technik und stellen die Basis zur Ermittlung des Energieverbrauchs je Fahrzeugsegment und Antriebsstrangkonzept (siehe Kapitel 4.3) dar. Weiterhin finden die definierten inneren und äußeren Fahrwiderstände sowie die definierte Fahrzeugcharakteristika bei der Erstellung eines Funktionsmodells (siehe Kapitel 5.1) und somit bei der anwendungsspezifischen Ermittlung des Potentials zur Reduktion des Streckenverbrauchs verschiedener Technologieelemente Berücksichtigung. Dies erlaubt die Bestimmung des sich relativ

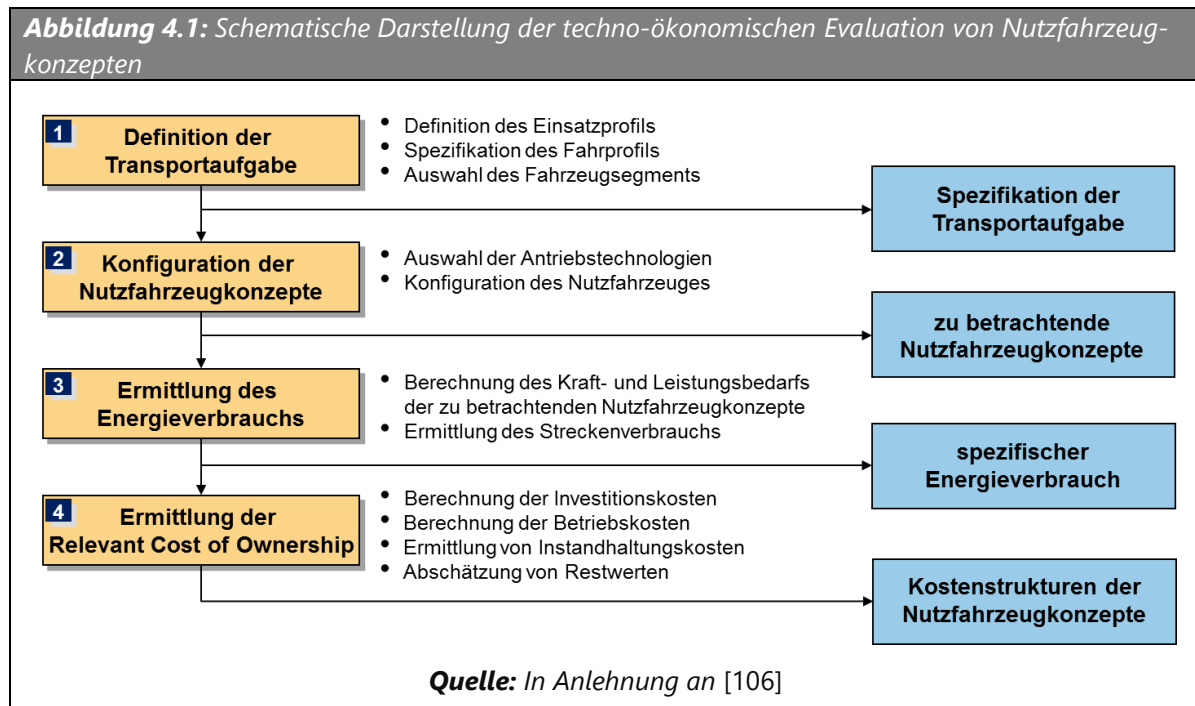
zur Basis ergebenden Einsparpotentials. Die angegebenen technisch relevanten Merkmale zur Lebensdauer finden im Rahmen der Ermittlung von Instandhaltungskosten (siehe Kapitel 4.4.1) Anwendung und erlaubt die Berücksichtigung vorhandener technologischer Einschränkungen.

4 Entwicklung eines techno-ökonomischen Bewertungsmodells für Nutzfahrzeugkonzepte

Kritische Erfolgsfaktoren zur Bewältigung der im Rahmen von Kapitel 1 beschriebenen Herausforderung sind die Anschaffungs- und Betriebskosten von konkurrierenden Antriebsstrangkzepten, da diese neben der Amortisationsdauer als ein ausschlaggebendes Kaufentscheidungskriterium von Flottenbetreibern angesehen werden (siehe hierzu Kapitel 2.2). Diese variieren jedoch in Abhängigkeit der zu erfüllenden Transportaufgabe, des Fahrzeugsegmentes sowie des zugrunde liegenden Antriebsstrangkzeptes. Um eine vergleichende und transparente Bewertung konkurrierender Antriebsstrangkzepten durchzuführen, bedarf es der Entwicklung eines ganzheitlichen und systemisch konsistenten techno-ökonomischen Bewertungsmodells, das sowohl die Transportaufgabe als auch technische und ökonomische Fahrzeugcharakteristika berücksichtigt. Damit die Konsistenz der verwendeten Eingabedaten sichergestellt ist, wurden umfassende Datenerhebungen (siehe Kapitel 3) sowie Modellrechnungen (siehe Kapitel 4.3, Kapitel 4.4 und Kapitel 5.3) durchgeführt. Im Gegensatz zu bestehenden Analysen wird der Einfluss alternativer Antriebskonzepten auf die Nutzlast und das Nutzvolumen berücksichtigt. Ebenso erlaubt das im Folgenden erläuterte Vorgehen eine umfassende und systemische Analyse der Kostenstrukturen der für den deutschen Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt relevanten Fahrzeugsegmente (siehe Kapitel 2.1) und konkurrierenden Antriebsstrangkzepten. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes sind vor- und nachgelagerte Stufen bzw. Prozessschritte in die Betrachtung integriert sowie Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Einflussgrößen berücksichtigt. Dabei erfolgen erstmals eine quantitative Ermittlung von spezifischen Instandhaltungskosten und eine Abschätzung von Restwerten für Nutzfahrzeugkonzepte mit alternativen Antriebstechnologien.

Die Vorgehenssystematik des Bewertungsmodells ist dem entwickelten Szenariomodell (siehe hierzu Kapitel 6) inhärent und gliedert sich insgesamt in vier Schritte (siehe Abbildung 4.1). Die Definition der Transportaufgabe und die Wahl des Fahrzeugsegmentes (Schritt 1) sind entscheidend für die Konfiguration der zu betrachtenden An-

triebsalternativen (Schritt 2). Entsprechend der zugrunde gelegten Konfiguration und Transportaufgabe werden der Energieverbrauch (Schritt 3) und die relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung (RCO) (Schritt 4) ermittelt.



Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Bewertungsmodells detailliert erläutert.

4.1 Definition der Transportaufgabe

Um eine vergleichende und transparente Bewertung verschiedener Nutzfahrzeugkonzepte zu ermöglichen ist die Spezifikation der Transportaufgabe elementar. Die Transportaufgabe wird im Wesentlichen durch die Art des zu transportierenden Gutes sowie die zeitlichen und räumlichen Merkmale des Transportprozesses beeinflusst [107]. Die zeitlichen und räumlichen Merkmale einer Transportaufgabe sind gekennzeichnet durch den Entfernungsbereich sowie charakteristische Eigenschaften des Einsatzprofils. Es werden drei verschiedene Entfernungsbereiche: Nahbereich (Entfernungsstufen bis 50 km), Regionalbereich (Entfernungsstufen zwischen 51 und 150 km) und Fernbereich (Entfernungsstufen größer 150 km), entsprechend der amt-

lichen Statistik unterschieden [56]. Die Entfernungsstufe ist ein Merkmal zur Beschreibung der räumlichen Beziehung im Güterkraftverkehr, wobei die auf einer Fahrt zurückgelegten Kilometer nach Klassen zusammengefasst werden [108]. Typische Einsatzprofile im Straßengüterverkehr sind der urbane Verteilerverkehr, der regionale Güterverkehr sowie der Güterfernverkehr [109]. Merkmale dieser Einsatzprofile sind die Jahresfahrleistung, die Tagesfahrleistung, die gravimetrische Auslastung (Verhältnis von tatsächlicher und maximaler Nutzlast), die volumetrische Auslastung (Verhältnis von tatsächlichem und maximalem Nutzvolumen) und charakteristische Streckenanteile (urban, regional und Autobahn). Den Streckenanteilen wiederum sind charakteristische Fahrzyklen (urban: städtischer Zyklus, regional: regionaler Zyklus, Autobahn: Autobahnzyklus) zugeordnet. Zusammenfassend beinhaltet Tabelle 4.1 die Definition sowie beispielhafte Merkmale von Transportaufgaben.

Tabelle 4.1: Definition sowie beispielhafte Merkmale von Transportaufgaben			
gewerblicher Verkehr			
Transportaufgabe	Gütertransport im Nahbereich	Gütertransport im Regionalbereich	Gütertransport im Fernbereich
Entfernungsbereich	bis 50 km	51-150 km	> 150 km
Einsatzprofil	urbaner Verteilerverkehr	regionaler Verteilerverkehr	Güterfernverkehr
Jahresfahrleistung	z.B. 40.000 km	z.B. 60.000 km	z.B. 100.000 km
Tagesfahrleistung	z.B. 150 km	z.B. 230 km	z.B. 380 km
gravimetrische Auslastung	z.B. 40 %		
volumetrische Auslastung	z.B. 90 %		
Streckenanteil:	z.B.	z.B.	z.B.
– urban	80 %	20 %	0 %
– regional	20 %	70 %	20 %
– Autobahn	0 %	10 %	80 %

4.2 Konfiguration des Nutzfahrzeugkonzeptes

Nach der Spezifikation der Transportaufgabe und der Fahrzeugwahl erfolgt die Konfiguration des Nutzfahrzeugkonzeptes. Dabei sind fahrzeugcharakteristische Parameter wie z.B. die Querschnittsfläche, der Luft- und Rollwiderstandsbeiwert, die Leistung

der eingesetzten Energiewandler, die Kapazität der Energiespeicher, die Simulationsmasse etc. festzulegen. Diese werden zur Ermittlung des streckenspezifischen Energieverbrauchs (siehe hierzu Kapitel 4.3) und zur Ermittlung der Investitionskosten eines Fahrzeugkonzeptes (siehe hierzu Kapitel 4.4) herangezogen.

Die Querschnittsfläche, der Luftwiderstandsbeiwert, der Rollwiderstandsbeiwert und die Masse des Basisfahrzeuges wurden in Kapitel 3 für die relevanten Fahrzeugsegmente festgelegt. Die Leermasse m^{leer} eines Nutzfahrzeugkonzeptes für das Fahrzeugsegment i mit der Antriebstechnologie j berechnet sich aus der Addition der Basismasse m_i^{Basis} mit den spezifischen Massen $m_{k,i,j}^A$ aller betrachteten Komponenten k des jeweiligen Antriebsstrangkonzepthes:

$$m_{i,j}^{\text{leer}} = \sum_{k=1}^n m_{k,i,j}^A + m_i^{\text{Basis}} \quad (13)$$

Die leistungsabhängige Masse $m_{k,i,j}$ einer Komponente k ergibt sich aus dem Produkt der gravimetrischen Leistungsdichte und der spezifischen Auslegung dieser. Die Masse der Zuladung $m_{i,j}^{\text{Zul}}$ wird nach Gleichung (14) errechnet und ergibt sich aus der Differenz des zulässigen Gesamtgewichts m_i^{zGG} und der Leermasse des Fahrzeuges unter Berücksichtigung der gravimetrischen Auslastung Al^{grav} in Prozent.

$$m_{i,j}^{\text{Zul}} = Al^{\text{grav}} \cdot (m_i^{\text{zGG}} - m_{i,j}^{\text{leer}}) \quad (14)$$

Schließlich ergibt sich die Simulationsmasse $m_{i,j}^{\text{Sim}}$ aus der Summe von Zuladungsmasse und der Leermasse:

$$m_{i,j}^{\text{Sim}} = m_{i,j}^{\text{Zul}} + m_{i,j}^{\text{leer}} \quad (15)$$

Dabei ist zu beachten, dass stets gilt:

$$m_{i,j}^{\text{leer}} \leq m_{i,j}^{\text{Sim}} \leq m_{i,j}^{\text{zGG}} \quad (16)$$

Das Volumen $V_{i,j}^A$ eines Antriebsstrangkzeptes wird aus der Summe der leistungsabhängigen Volumina der betrachteten Komponenten $V_{k,i,j}$ des jeweiligen Antriebsstrangkzeptes²⁶ berechnet:

$$V_{i,j}^A = \sum_{k=1}^n V_{k,i,j} \quad (17)$$

4.3 Ermittlung des Energieverbrauchs

Für eine vergleichbare und konsistente Bewertung verschiedener Antriebsstrangtechnologien ist die Ermittlung des Energieverbrauchs mittels Modellsimulation unter festgelegten Rahmenbedingungen essentiell.

Der streckenbezogene Energieverbrauch E entspricht nach Gleichung (18) dem Energiebedarf zur Überwindung der äußeren und inneren Fahrwiderstände in Abhängigkeit eines zugrunde liegenden Fahrprofils.

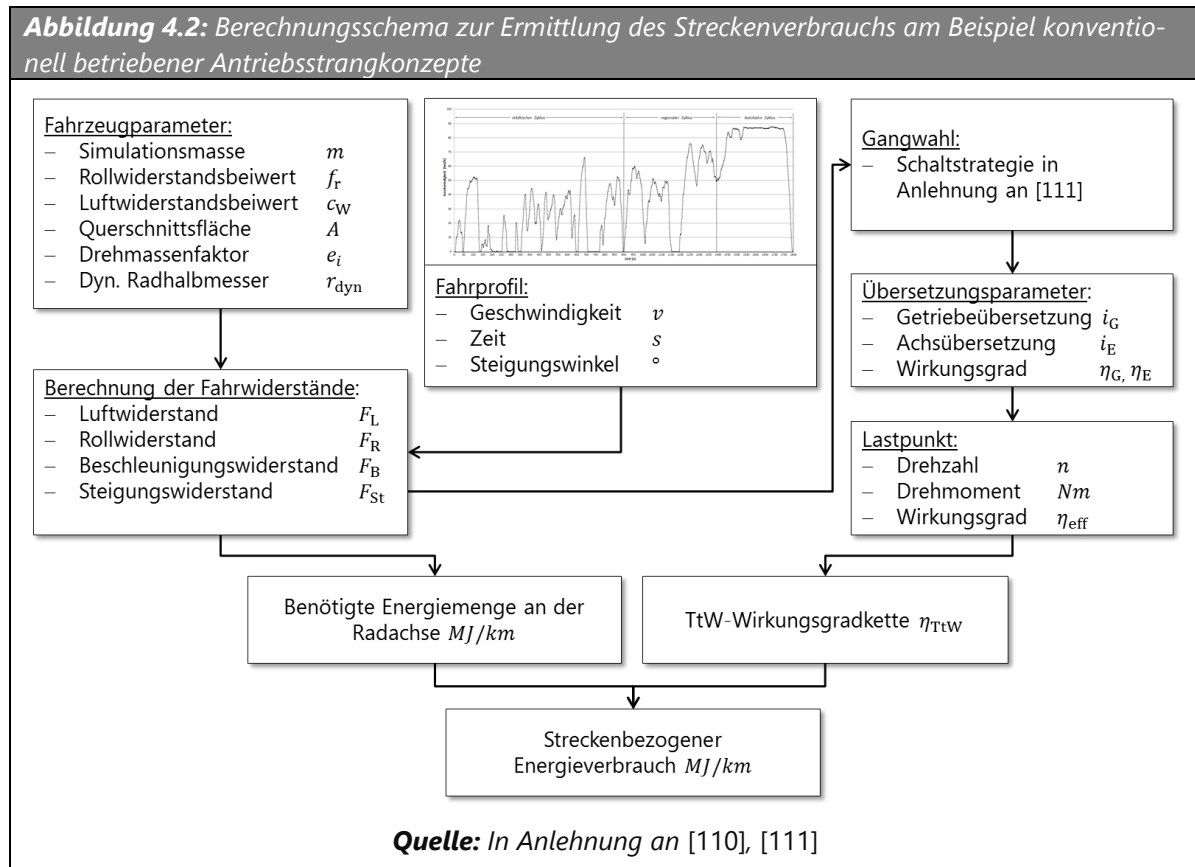
$$E = \frac{\int \frac{1}{\eta_{\text{TtW}}} \cdot [F_R + F_L + F_B + F_{St}] \cdot v \cdot dt}{\int v \cdot dt} \quad (18)$$

Äußere Fahrwiderstände sind der Rollwiderstand F_R , der Luftwiderstand F_L , der Beschleunigungswiderstand F_B und der Steigungswiderstand F_{St} . Der Antriebsstrangwirkungsgrad η_{TtW} ist ein Maß für die Effizienz der Energiewandlung der zugrunde liegenden Technologie und spiegelt die inneren Fahrwiderstände wider. Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs auf Basis einer Rückwärtskalkulation²⁷. Dabei erfolgt die Verbrauchsermittlung vom Rad ausgehend bis hin zu den antreibenden Komponenten unter Berücksichtigung der Fahrzeugkonfiguration (siehe Kapitel 4.2), einem transportaufgabenspezifischen Fahrprofil und der Antriebsstrangtechnologie zugrunde liegenden technischen Attribute (siehe hierzu

²⁶ Es werden ausschließlich die Komponenten entsprechend der im Rahmen von Kapitel 3 aufgezeigten Wirkungsgradkette betrachtet. Zusätzliche Volumina z.B. aufgrund unterschiedlicher Anforderungen an das Thermomanagements sind unberücksichtigt.

²⁷ Im Gegensatz zur Vorwärtssimulation stellt die Rückwärtskalkulation eine Vereinfachung dar, da diese kein Fahrer abbildet und keine detaillierte physikalische Modellierung einzelner Prozessabläufe vorsieht.

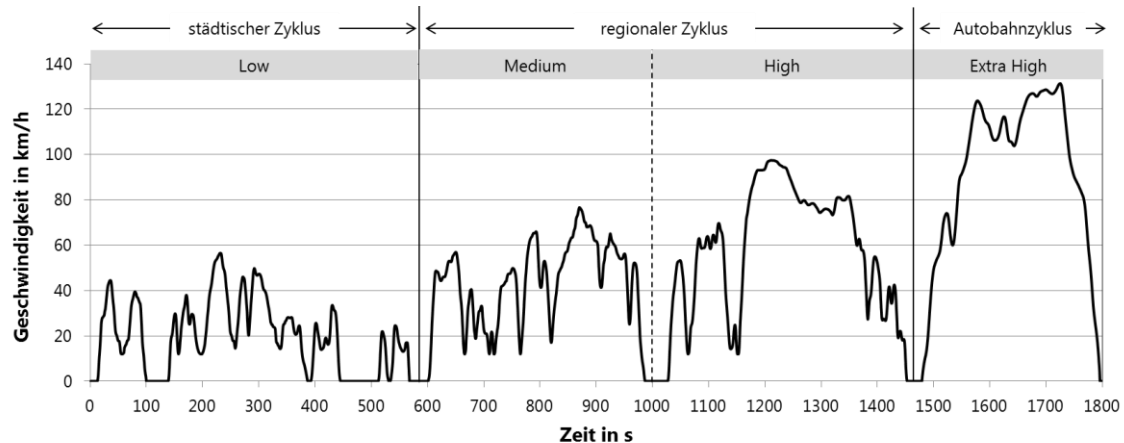
Kapitel 3). Das verwendete Berechnungsschema für konventionell betriebene Nutzfahrzeugkonzepte ist in Abbildung 4.2 dargestellt.



Um zusätzliche Funktionen von alternativen Antriebskonzepten, wie z.B. Start-Stopp, Rekuperation, rein elektrisches Fahren etc., adäquat abbilden zu können, wurden Anpassungen in der Berechnungslogik, analog zum Vorgehen beschrieben in [110] vorgenommen. Für die Typzulassung von Fahrzeugen der Klasse N₁ (leichte Nutzfahrzeuge) ist zur Verbrauchs- und Emissionsmessung der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) gesetzlich vorgegeben. Aufgrund der hohen Diskrepanzen von realen zu auf dem Prüfstand gemessenen Verbräuchen, die 2014 durchschnittlich um 38 % über den bei der Typzulassung ermittelten Werten lagen, steht der NEFZ vermehrt in der Kritik [112]. Vor diesem Hintergrund und dem Ziel realitätsnähere Verbrauchswerte zu ermitteln erfolgte daher die Einführung eines weltweit harmonisierten Testzyklus, dem WLTP (World Harmonized Light-duty vehicles Test Procedure) für Personen-

kraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge gearbeitet [113]. Vor diesem Hintergrund basiert die Ermittlung des Energieverbrauchs von leichten Nutzfahrzeugen auf dem WLTP-Testzyklus. Das Fahrprofil des WLTP für Hochleistungsfahrzeuge mit einem Leistungsgewicht (Antriebsleistung in kW pro Tonne Leergewicht) von mehr als 34 kW/Tonne kann Abbildung 4.3 entnommen werden.

Abbildung 4.3: World Harmonized Light-Duty vehicles Test Procedure (WLTP)



Gesamt:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 46,5 km/h; Max. Geschwindigkeit: 131 km/h; Strecke: 23.262 m

städtischer Zyklus:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 18,9 km/h; Max. Geschwindigkeit: 57 km/h; Strecke: 3.095 m

regionaler Zyklus:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 48,3 km/h; Max. Geschwindigkeit: 97 km/h; Strecke: 11.913 m

Autobahnzyklus:

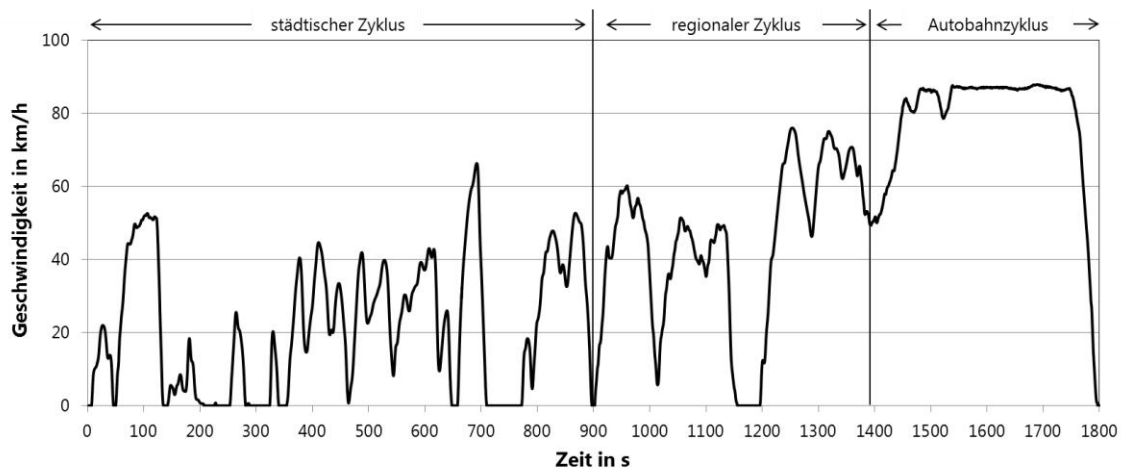
Durchschnittsgeschwindigkeit: 92,0 km/h; Max. Geschwindigkeit: 131 km/h; Strecke: 8.254 m

Quelle: eigene Darstellung auf Basis [114]

Im Gegensatz zu Fahrzeugen der Klasse N₁ werden bei Fahrzeugen der Klassen N₂ und N₃ ausschließlich Schadstoffemissionen des Motors auf einem Motorprüfstand in einer definierten Folge von Betriebszuständen bezogen auf die im Test verrichtete Arbeit des Motors in g/kWh gemessen [115]. Eine vergleichbare Ermittlung der CO₂-Emissionen und damit auch des Energieverbrauchs erfolgte bisher nicht. Rückschlüsse auf das Gesamtfahrzeug ausschließlich auf Basis der Motorprüfstandsmessungen sind aufgrund einer hohen Diversifizierung einzelner Fahrzeugmodelle nicht zielführend

[58]. Damit die Ermittlung des Energieverbrauchs in Analogie zu Fahrzeugen der Klasse N_1 durchgeführt werden kann, wird für die Fahrzeuge der Klassen N_2 und N_3 der WHVC-Zyklus (World Harmonized Vehicle Cycle) verwendet. Dieser ist zum Zwecke von Gesamtfahrzeugmessungen auf dem Rollenprüfstand entwickelt worden (siehe hierzu Abbildung 4.4).

Abbildung 4.4: World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)



Gesamt:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 40,1 km/h; Max. Geschwindigkeit: 88 km/h; Strecke: 20.058 m

städtischer Zyklus:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 21,3 km/h; Max. Geschwindigkeit: 66 km/h; Strecke: 5.321 m

regionaler Zyklus:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 43,6 km/h; Max. Geschwindigkeit: 76 km/h; Strecke: 5.818 m

Autobahnzyklus:

Durchschnittsgeschwindigkeit: 76,7 km/h; Max. Geschwindigkeit: 88 km/h; Strecke: 8.919 m

Quelle: eigene Darstellung auf Basis [116]

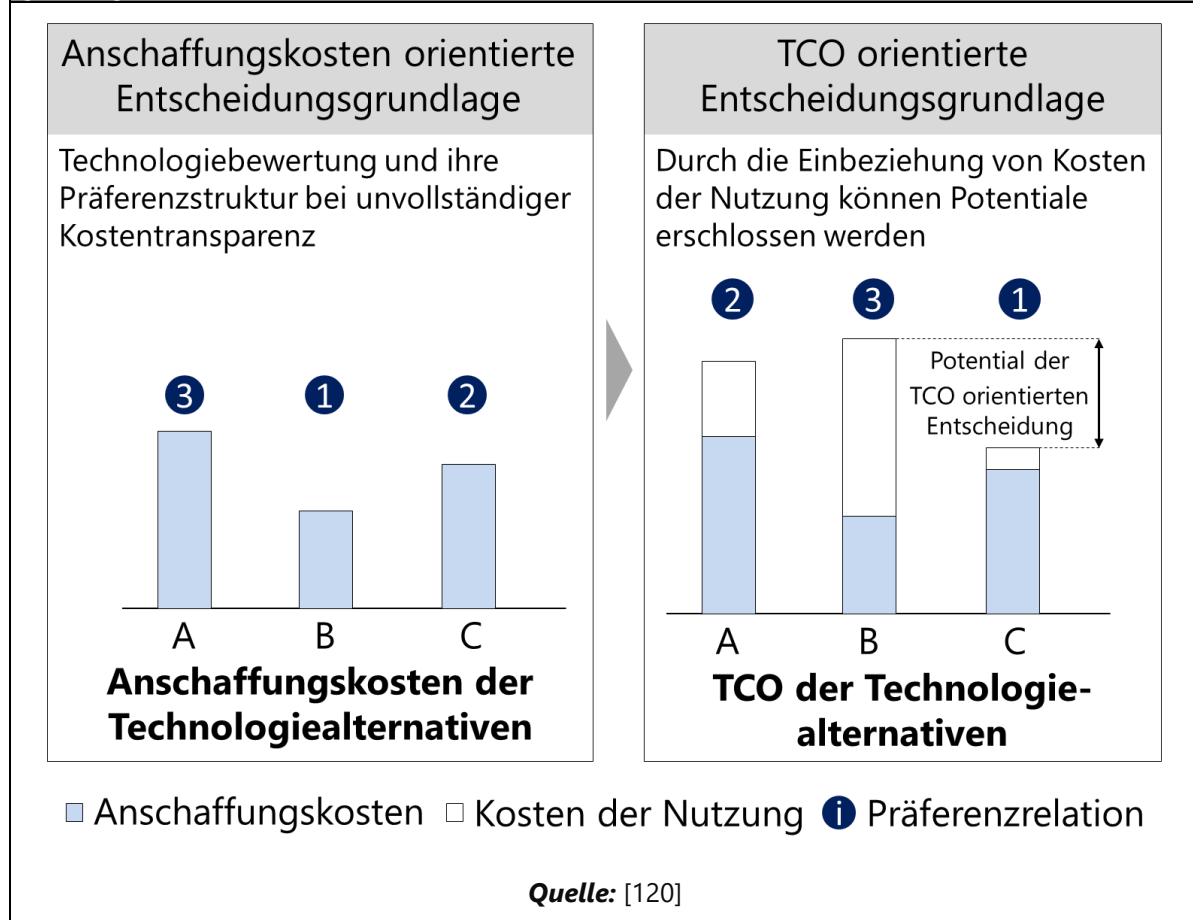
4.4 Ermittlung der relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung

Um die Vergleichbarkeit der ökonomischen Ergebnisse zu gewährleisten, beziehen sich die im weiteren Verlauf angeführten monetären Angaben auf die europäische Währung und sind hinsichtlich des Jahres 2010 inflationsbereinigt. Alle Angaben werden daher mit „EUR₂₀₁₀“ gekennzeichnet. Die Datengrundlage zur Inflationsbereini-

gung und Währungsrechnung können dem Anhang C, den Tabellen C.1 und C.2, entnommen werden.

Die Kostenentwicklung eines Produktes ist gekennzeichnet durch die Phasen der Entstehung, der Nutzung und der Entsorgung. Die kumulierten Kosten der einzelnen Phasen werden als Lebenslaufkosten bezeichnet [117]–[119]. Wird lediglich die Phase der Nutzung betrachtet, so werden die innerhalb dieser Phase kumulierten Kosten als Total Cost of Ownership (TCO) oder Gesamtkosten der Nutzung bezeichnet [117]. Diese berücksichtigen die Investitionskosten und alle laufenden Kosten eines Produktes während der Nutzungsdauer. Die TCO Analysesystematik wurde im Rahmen der Beschaffungsstrategie entwickelt und adressiert die Bestimmung der Vorteilhaftigkeit eines Investitionsobjektes im Vergleich zu potentiellen Investitionsalternativen. Dabei unterstützt die TCO-Analyse die Identifizierung und Bewertung entscheidungsrelevanter Kostenfaktoren mit dem Ziel der Bildung von lebenszyklusorientierten Präferenzrelationen bei vergleichbaren Investitionsalternativen [118], [120]. Die Festlegung der Anschaffungskosten als Entscheidungsgrundlage kann zu einer anderen Präferenzrelation führen, da diese lediglich ein Fragment der Gesamtkosten über die Nutzungsphase darstellen. Diese Entscheidungsproblematik veranschaulicht Abbildung 4.5.

Abbildung 4.5: Präferenzrelationen bei Anschaffungspreis und TCO orientierter Entscheidungsgrundlage



Für die ökonomische Bewertung der Fahrzeugkonzepte werden die relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung herangezogen (siehe Abbildung 4.6). Im Gegensatz zum Umfang der TCO konzentrieren sich diese auf die wesentlichen Kostenbestandteile zur Differenzierung alternativer Antriebskonzepte.

Abbildung 4.6: Bestandteile der relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung

Investitionen in EUR	laufende Kosten	
<ul style="list-style-type: none"> • Kaufpreis Fzg. • Kaufpreis EVSE 	<div> <div>fixe Kosten in EUR pro Jahr</div> <div>variable Kosten in EUR pro km</div> </div>	
Sonstiges in EUR	<ul style="list-style-type: none"> • Kfz-Versicherung • Kfz-Steuer • Fahrpersonalkosten • Instandhaltung EVSE 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoffkosten • Instandhaltung Fzg. • Maut
<ul style="list-style-type: none"> • Abschreibung • Restwert • Steuervorteil • Subventionen 		

Die formale Berechnung der relevanten Kosten der Fahrzeugnutzung $RCO_{i,j}$ für das Fahrzeugsegment i mit dem Antriebsstrangkonzept j erfolgt gemäß:

$$RCO_{i,j} = (1+z)^h \cdot (IK_{i,j}^F + IK_{i,j}^I - S_{i,j}^{F,I}) - RW_{i,j}^F - StV_{i,j}^F + \left(\frac{(1+z)^h - 1}{z} \right) \cdot (LK_{i,j}^{a,F} + LK_{i,j}^{a,I}) \quad (19)$$

Es wird der Kapitalendwert unter Berücksichtigung des Anschaffungspreises bzw. der Investitionskosten $IK_{i,j}^F$ des Fahrzeuges, der Investitionskosten benötigter Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur $IK_{i,j}^I$ und der über die Haltedauer h in Jahren jährlich anfallenden laufenden Kosten $LK_{i,j}^{a,F}$ des Fahrzeuges bzw. der installierten Infrastrukturmaßnahme $LK_{i,j}^{a,I}$ ermittelt. Der generierte Steuervorteil $StV_{i,j}^F$ und der erzielte Restwert²⁸ $RW_{i,j}^F$ des Fahrzeuges zum Ende der Haltedauer wird dabei abgezogen. Zusätzlich können monetärer Subventionen sowohl für das Fahrzeug als auch für die Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur $S_{i,j}^{F,I}$ berücksichtigt werden. Die Kosten werden unter Berücksichtigung eines mittleren Zinssatzes z aufgezinst. Bei mehreren Investitionsalternativen ist ein Investitionsobjekt dann vorteilhaft, falls dessen RCO geringer sind als die der Alternativen. Maßgeblich hierfür sind besonders die Investitionskosten und die laufenden Kosten, welche für jede Fahrzeugkonfiguration separat bestimmt werden.

²⁸ siehe Kapitel 4.4.2

Die Investitionskosten $IK_{i,j}^F$ eines Nutzfahrzeugkonzeptes werden ermittelt, indem die Herstellkosten $HK_{i,j}^F$ mit dem „Retail Price Equivalent“-Faktor (RPE) multipliziert werden (siehe Gleichung (20)). Die Mehrwertsteuer wird dabei nicht berücksichtigt, da der Flottenbetreiber als Unternehmer nach § 15 des Umsatzsteuergesetzes vorsteuerabzugsbefähigt ist [121].

$$IK_{i,j}^F = HK_{i,j}^F \cdot RPE \quad (20)$$

Der RPE setzt die indirekten Kostenfaktoren zu den direkten Produktionskosten eines Fahrzeuges ins Verhältnis [122], [123]. Mit Hilfe des RPE werden zum einen Gemeinkosten wie z.B. Entwicklungskosten, Kosten für die Logistik und das Marketing, und zum anderen die Margen des Herstellers und Händlers berücksichtigt. Die Herstellkosten setzen sich nach Gleichung (21) aus den Kosten des Basisfahrzeuges HK_i^{Basis} und der Summe der konfigurationsabhängigen Kosten der einzelnen Antriebsstrangkomponenten $HK_{i,j}^A$ zusammen. Die Kosten einer Antriebsstrangkomponente k ergeben sich aus dem Produkt der Konfigurationsangabe $x_{k,i,j}$ (z.B. für die Antriebsstrangkomponente Batteriesystem, 2 kWh nutzbarer Energieinhalt) und dem Basiswerte der Komponentenkosten pro Einheit der Kosteneinflussgröße $a_{k,i,j}$ (z.B. 400 EUR/kWh).

$$HK_{i,j}^F = HK_i^{\text{Basis}} + HK_{i,j}^A = HK_i^{\text{Basis}} + \sum_{k=1}^n a_{k,i,j} \cdot x_{k,i,j} \quad (21)$$

Die Herstellkosten der Basisfahrzeuge und die Investitionskosten des Sattelauflegers wurden der Literatur entnommen und können der Tabelle 4.2 entnommen werden. Zugrunde gelegt ist der jeweilige Median.

Tabelle 4.2: Herstellkosten der Basisfahrzeuge und Investitionskosten des Sattelauflegers		
Fahrzeugsegment	Kostenart	EUR₂₀₁₀
3,5t zGG	HK	15.125
7,5t zGG	HK	21.563
12t zGG	HK	32.563
18t zGG	HK	51.000
26t zGG	HK	51.000
18t zGG (SZM)	HK	56.250
Sattelaufleger für SZM	IK	23.005
Quellen: [20], [31], [124]–[126]		

Die Basiswerte der Komponentenkosten pro Einheit der Kosteneinflussgröße $a_{k,i,j}$ sind ebenfalls der einschlägigen Literatur entnommen und können der Tabelle 4.3 und der Tabelle 4.4 entnommen werden.

Tabelle 4.3: Spezifische Komponentenkosten pro Einheit der Kosteneinflussgröße		
Komponente	Einheit	Basiswert
Dieselmotor ≤2.998 cm ³ Hubraum	EUR ₂₀₁₀ /kW	43,2
Dieselmotor >2.998 cm ³ Hubraum	EUR ₂₀₁₀ /kW	56,5
Erdgasmotor ≤2.998 cm ³ Hubraum	EUR ₂₀₁₀ /kW	37,7
Erdgasmotor >2.998 cm ³ Hubraum	EUR ₂₀₁₀ /kW	71,2
Elektrische Maschine	EUR ₂₀₁₀ /kW _{el}	Erfahrungskurve
Leistungselektronik	EUR ₂₀₁₀ /kW _{el}	Erfahrungskurve
Batteriesystem (Hochenergetyp)	EUR ₂₀₁₀ /kWh	Erfahrungskurve
Batteriesystem (Hochleistungstyp)	EUR ₂₀₁₀ /kWh	Erfahrungskurve
Brennstoffzellensystem (NT-PEM)	EUR ₂₀₁₀ /kW _{el}	Erfahrungskurve
Wasserstoffspeichersystem (700bar)	EUR ₂₀₁₀ /kg H ₂	Erfahrungskurve
Wasserstoffspeichersystem (350bar)	EUR ₂₀₁₀ /kg H ₂	Erfahrungskurve
Erdgasspeichersystem LNG (1bar)	EUR ₂₀₁₀ /kg LNG	Erfahrungskurve
Erdgasspeichersystem CNG (200bar)	EUR ₂₀₁₀ /kg CNG	53
Dieselspeichersystem	EUR ₂₀₁₀ /l Diesel	2,0
Abgasnachbehandlung ICE-D (EUR VI)	EUR ₂₀₁₀ /cm ³ Hubvolumen	0,63 ^{a)}
Abgasnachbehandlung ICE-NG (EUR VI)	EUR ₂₀₁₀ /cm ³ Hubvolumen	0,22 ^{b)}
Getriebe AMT	EUR ₂₀₁₀ /kg	18,5
Getriebe MT	EUR ₂₀₁₀ /kg	14,9
Ladegerät (On-Board)	EUR ₂₀₁₀ /kW	100 ^{b)}
^{a)} eigene Abschätzung unter Berücksichtigung von Systemkosten aus [127]; ^{b)} eigene Abschätzung		
Quellen: [20], [31], [33], [59], [128], [129]		

Für neuartige Komponenten des Antriebsstrangs verläuft die Kostenentwicklung sehr dynamisch und ist von den am Markt erzielten Stückzahlen pro Jahr abhängig. Daher werden für diese Komponenten die spezifischen Kosten auf Basis von Erfahrungskurven ermittelt. Die Erfahrungskurventheorie besagt, dass die Stückkosten konstant sinken, wenn sich die kumulierte Produktionsmenge erhöht. Dieser Zusammenhang zwischen der Verringerung der Stückkosten SK eines Produkts um einen konstanten Prozentsatz (Lernrate r) bei einer Steigerung der kumulierten Produktionsmenge M_1 auf M_2 wird durch Gleichung (22) beschrieben [130].

$$SK_2 = SK_1 \cdot \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^b \quad (22)$$

Der Steigungsparameter b wird dabei von der Lernrate entsprechend Gleichung (23) bestimmt.

$$b = \frac{\ln(r)}{\ln(2)} \quad ; \text{wenn gilt: } -1 < b < 0 \quad (23)$$

Diese Lernrate lässt sich durch statische und dynamische Skaleneffekte erklären. So sinken beispielsweise die Fixkosten der Produktion mit jedem zusätzlich produzierten Gut (statisch) oder durch die Produktivitätssteigerung eines Mitarbeiters, was den Einsatz von Produktionsfaktoren reduziert (dynamisch) [131].

Erforderliche und zu spezifizierende Parameter zur Anwendung des Erfahrungskurvenansatzes sind somit die kumulierte Produktionsmenge einer Komponente, die der kumulierten Produktionsmenge entsprechenden spezifischen Komponentenkosten und die Lernrate. Eine Zusammenfassung der zugrunde liegenden Erfahrungskurvenparameter sind der Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Tabelle 4.4: Erfahrungskurvenparameter für die Berechnung der spezifischen Komponentenkosten			
Komponente	Produktionsmenge M_1	spez. Komponentenkosten bei Produktionsmenge M_1	Lernrate
Elektrische Maschine	500.000	20,16 EUR ₂₀₁₀ /kW	84%
Leistungselektronik	500.000	15,55 EUR ₂₀₁₀ /kW	81%
Batteriesystem (Hochenergiestyp)	100.000	266 EUR ₂₀₁₀ /kWh	86%
Batteriesystem (Hochleistungstyp)	100.000	470 EUR ₂₀₁₀ /kWh	94%
Brennstoffzellensystem (NT-PEM)	100.000	51 EUR ₂₀₁₀ /kW _{el}	78%
Wasserstoffspeichersystem (700bar)	80.000	558 EUR ₂₀₁₀ /kg H ₂	87%
Wasserstoffspeichersystem (350bar)	80.000	457 EUR ₂₀₁₀ /kg H ₂	85%
Erdgasspeichersystem LNG (1bar)	10.000	44 EUR ₂₀₁₀ /kg LNG	93%
Quellen: in Anlehnung an [129], [132]–[135]			

Die jährlich laufenden Kosten $LK_{i,j}^{a,F}$ ergeben sich nach Gleichung (24) aus der Summe der jährlich konstanten $LK_{i,j}^{a,fix}$ und variablen $LK_{i,j}^{a,var}$ Kostenanteilen.

$$LK_{i,j}^{a,F} = LK_{i,j}^{a,fix} + LK_{i,j}^{a,var} \quad (24)$$

Der Fixkostenanteil setzt sich aus den jährlichen Aufwendungen für die Kfz-Versicherung $Ver_{i,j}^a$, für die Kfz-Steuer $St_{i,j}^a$ und das Fahrpersonal PK^a zusammen:

$$LK_{i,j}^{a,fix} = St_{i,j}^a + Ver_{i,j}^a + PK^a \quad (25)$$

Basierend auf dem Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG) ergeben sich die Steuersätze für Fahrzeuge der Fahrzeugklasse N_1 aus der zulässigen Gesamtmasse und für Fahrzeuge der Fahrzeugklassen N_2 und N_3 unter zusätzlicher Berücksichtigung der jeweiligen Schadstoffklasse. Die Dauer der Steuerbefreiung für Elektrofahrzeuge ist abhängig vom Tag der Zulassung. Elektrofahrzeuge die zwischen, dem 18. Mai 2011 und dem 31. Dezember 2020 neu zugelassen werden, sind über zehn Jahre von der Kraftfahrzeugsteuer (Kfz-Steuer) befreit [136]. Ein Fahrzeug gilt als Elektrofahrzeug, wenn der Antrieb ausschließlich durch Elektromotoren erfolgt, die ganz oder überwiegend aus mechanischen oder elektrochemischen Energiespeichern oder aus emissionsfrei betriebenen Energiewandlern gespeist werden [136]. Demnach sind alle Fahrzeuge mit rein batterie- bzw. brennstoffzellenelektrischen Antriebssträngen von der Kfz-Steuer befreit, inkl. der Antriebsstränge mit Aggregat zur Reichweitenverlängerung.

Aufgrund der Komplexität zur Bestimmung des exakten Wertes der Kfz-Versicherung, wird vereinfacht ein jährlicher Versicherungssatz von 1,5 % der Investitionskosten eines Nutzfahrzeugkonzeptes herangezogen. Dieser Ansatz berücksichtigt damit implizit einen Risikoaufschlag für neue Technologien für die Versicherungskosten alternativer Antriebskonfigurationen [137].

Die laufenden und jährlichen variablen Kosten setzen sich nach Gleichung (26) aus den Kosten des Energieverbrauchs $KE_{i,j}^a$, den Instandhaltungskosten²⁹ $IHK_{i,j}^a$ und der zu entrichtenden Maut $T_{i,j}^a$ zusammen.

$$LK_{i,j}^{a,var} = KE_{i,j}^a + IHK_{i,j}^a + T_{i,j}^a \quad (26)$$

²⁹ siehe Kapitel 4.4.1

Die Kosten des jährlichen Energieverbrauchs werden anhand Gleichung (27) ermittelt und sind das Produkt aus dem transportaufgabenspezifischen Energieverbrauch $EV_{i,j}$, der jährlichen Fahrleistung FL^a und des Bruttoverbraucherpreises BVP_{Kr} des Kraftstoffs Kr .

$$KE_{i,j}^a = (EV_{i,j} \cdot BVP_{Kr} + ABV_{i,j} \cdot HL) \cdot FL^a \quad (27)$$

Der Bruttoverbraucherpreis stellt dabei die Summe aus den Nettoenergiekosten NEK_{Kr} und der Energiesteuer Est_{Kr} des Kraftstoffs dar. Im Falle der mit Dieselmotoren betriebenen Fahrzeugkonzepte wird zusätzlich der Verbrauch der Harnstofflösung AdBlue® $ABV_{i,j}$ und die entsprechenden Kosten HL dieser berücksichtigt. Im Falle von Fahrzeugkonzepten die sowohl im CS- als auch im CD-Mode betrieben werden, wird der Gesamtenergieverbrauch in Abhängigkeit der jeweiligen Streckenanteile ermittelt.

Die Mauttarife ergeben sich aus der Summe der fälligen Teilsätze entsprechend der Anzahl der Achsen und der Schadstoffklasse eines Nutzfahrzeugkonzeptes. In Deutschland sind Mauttarife für die Streckennutzung auf Bundesautobahnen und teilweise auf Bundesstraßen von Nutzfahrzeugkonzepten mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 7,5t zu entrichten [138]. Bis zum Jahr 2018 wird vereinfachend nur der Autobahnanteil in vollem Umfang berücksichtigt. Aufgrund der Billigung des Bundesrates zur Mautausweitung auf alle Bundesstraßen wird zum Jahre 2018 ebenfalls der regionale Fahranteil berücksichtigt [139].

Nach § 7 des Einkommenssteuergesetzes (EStG) sind bei abnutzbarem Anlagevermögen (z.B. Kraftfahrzeuge) der durch die Nutzung bedingte Wertverlust und die laufenden Kosten als Betriebsausgaben steuerlich geltend zu machen. Die Berücksichtigung des zu erzielenden Steuervorteils³⁰ erfolgt nach Gleichung (28).

³⁰ Vorausgesetzt ein ausreichend hoher zu versteuernder Gewinn liegt vor.

$$StV_{i,j} = \left[\left[\left(\frac{IK_{i,j}^F - S_{i,j}^F}{n} \right) + LK_{i,j}^{a,F} \right] \cdot \left(\frac{(1+z)^h - 1}{z} \right) \right] + \left(IK_{i,j}^F - S_{i,j}^F - RW_{i,j}^F \right) \cdot \left(1 - \frac{h}{n} \right) \cdot s \quad (28)$$

Der zu erzielende Steuervorteil entspricht dem Produkt aus der Summe der jährlich aufgezinster Betriebsausgaben unter Berücksichtigung der Differenz zwischen dem Buchungsrestwert und dem tatsächlich erzielten Restwert mit dem mittleren Unternehmensbesteuerungssatzes s in Deutschland. Die Höhe des Abschreibungssatzes für Abnutzung entspricht konstanten jährlichen Zahlungen, die sich aus der gleichmäßigen Verteilung (lineare Abschreibung oder Absetzung für Abnutzung in gleichen Jahresbeträgen) der Anschaffungs- oder Herstellungskosten auf die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer n ergeben [140]. Darüber hinaus können auch die laufenden Kosten im vollen Maße als Betriebsausgaben steuerlich geltend gemacht werden.

Investitionskosten der Ladeinfrastruktur umfassen die Installation von Ladesäulen und die Anschaffung von Ladekabel. Eine Übersicht der Investitionskosten und der laufenden Kosten pro Jahr je Leistungsklasse und Lademodi sind der Tabelle 4.5 zu entnehmen.

Tabelle 4.5: Kostenübersicht der Ladeinfrastruktur je Leistungsklasse und Lademodi		
Bezeichnung	Investitionskosten in EUR ₂₀₁₀	Laufende Kosten p.a. in EUR ₂₀₁₀
Mode 2 Ladekabel 3,7kW	331	-
Mode 2 Ladekabel 11kW	389	-
Mode 2 Ladekabel 22kW	479	-
Mode 3 Ladesäule 3,7kW	2.670	1.552
Mode 3 Ladesäule 11kW	3.535	1.552
Mode 3 Ladesäule 22kW	3.760	1.552
Mode 3 Ladesäule 44kW	7.474	1.552
Mode 4 Ladesäule 50kW	25.743	1.784
Mode 4 Ladesäule 60kW	28.629	1.784

Quelle: [141]

4.4.1 Ermittlung von Instandhaltungskosten

Die jährlichen Kosten der Instandhaltung $IHK_{i,j}^a$ umfassen die jährlichen Kosten für Wartung $WK_{i,j}^a$, Inspektion $INSK_{i,j}^a$ und Instandsetzungen von Systemkomponenten $ISK_{i,j}^a$:

$$IHK_{i,j}^a = WK_{i,j}^a + ISK_{i,j}^a + INSK_{i,j}^a \quad (29)$$

Der Begriff der Wartung ist durch die Maßnahmen gekennzeichnet, die zu einem verzögerten Abbau des Abnutzungsvorrats beitragen. Die Instandsetzung beschreibt hingegen Maßnahmen zur Wiederherstellung der Funktionalität einer fehlerhaften Einheit und berücksichtigt somit alle Tätigkeiten zum Austausch und Ersatz von Systemkomponenten. Die Inspektion dient zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Einheit und definiert, sofern erforderlich, Konsequenzen für eine weitere Nutzung [142].

Die Kostenelemente zur Ermittlung der Instandhaltungskosten werden je nach Antriebsstrangkonzept individuell anhand einer „bottom-up“-Betrachtung ermittelt. Maßnahmen der Fahrzeugpflege und zur Behebung möglicher Unfallschäden bleiben unberücksichtigt. Es werden ausschließlich Umfänge des Zugfahrzeuges berücksichtigt. Instandhaltungskosten für Sattelaufleger sind der Literatur entnommen [63].

Die jährlichen Wartungskosten $WK_{i,j}^a$ für das Fahrzeugsegment i mit dem Antriebsstrangkonzept j können wie folgt ermittelt werden:

$$WK_{i,j}^a = \frac{WK_{i,j}^{\text{ges}}}{FL^{\text{ges}}} \cdot FL^a = \left[\frac{\sum_{S=1}^x H_{S,i,j} \cdot (ME_{S,i,j} + PE_{S,i,j})}{FL^{\text{ges}}} \right] \cdot FL^a \quad (30)$$

Die Summe der über die Gesamtfahrleistung FL^{ges} je Serviceschritt S anfallenden Material- $ME_{S,i,j}$ und Personaleinsätze $PE_{S,i,j}$ unter Berücksichtigung einer bestimmten Häufigkeit eines Serviceschrittes $H_{S,i,j}$ bzgl. einer Antriebsstrangkomponente ergeben dabei die gesamten Wartungskosten $WK_{i,j}^{\text{ges}}$. Die Höhe der Personalkosten ist dabei von der benötigten Dauer des Serviceschrittes und dem stündlichen Personalkosten-

satz abhängig. Die Bestimmung der Häufigkeit eines Serviceschrittes erfolgt unter Berücksichtigung, sowohl einer fahrleistungsabhängigen als auch einer jahresbezogenen Angabe zum Serviceintervall einer Komponente. Die maximale Häufigkeit wird zur Berechnung der Wartungskosten herangezogen. Auf Basis einer Literaturanalyse und Expertengesprächen wurden die fahrzeugsegment- und antriebsstrangkonzep-tabhängigen Serviceschritte, die entsprechenden Serviceintervalle, Materialeinsätze und notwendige Zeiteinheiten festgelegt. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen mit einem Hubkolbenmotor als Aggregate zur Reichweitenverlängerung wurde ein verstärktes Downsizing berücksichtigt. Bei den MHEV, FHEV und PHEV Varianten wurde davon ausgegangen, dass der konventionelle Antriebsstrang um die Komponenten der Elektrifizierung ergänzt wird. Die berücksichtigten Wartungsmaßnahmen können dem Anhang D, Tabellen D.1 und D.2, entnommen werden. Diese variieren je nach Fahrzeugsegment sowie Antriebsstrangkonzzept und sind den Kategorien Hubkolbenmotor, Abgassystem, Triebstrang, Bremssystem, Druckluftsystem, Fahrwerk, Erdgassystem, Elektrifizierung, Wasserstoffsystem, und Sonstiges zugeordnet.

Die jährlichen Instandsetzungskosten $ISK_{i,j}^a$ für das Fahrzeugsegment i mit dem Antriebsstrangkonzzept j werden nach Gleichung (31) ermittelt.

$$ISK_{i,j}^a = \frac{ISK_{i,j}^{ges}}{FL^{ges}} \cdot FL^a = \left[\frac{\sum_{k=1}^x H_{k,i,j} \cdot (WBK_{k,i,j} + PE_{k,j,i})}{FL^{ges}} \right] \cdot FL^a \quad (31)$$

Die Summe der über die Gesamtfahrleistung FL^{ges} anfallenden Widerbeschaffungskosten $WBK_{k,i,j}$ je zu ersetzender Antriebsstrangkomponente K und des erforderlichen Personaleinsatzes $PE_{k,i,j}$ unter Berücksichtigung einer bestimmten Häufigkeit des Komponentenaustausches $H_{k,i,j}$ ergeben dabei die gesamten Instandsetzungskosten $ISK_{i,j}^{ges}$. Die Rückführung in den funktionsfähigen Zustand erfolgt dabei ausschließlich durch Ersatz der defekten Komponente und entspricht der Vorgehensweise vorgestellt in [143]. In Analogie zur Bestimmung der Häufigkeit eines Serviceintervalls wird zur Berechnung der Instandsetzungskosten die maximale Häufigkeit des

Komponentenaustausches herangezogen. Diese wird unter Berücksichtigung einer fahrleistungsabhängigen „*Mean Distance Between Failure*“ (MDBF) oder jahresabhängigen „*Mean Time Between Failure*“³¹ (MTBF) mittleren Lebensdauer einer Antriebsstrangkomponente bestimmt. Die MDBF bzw. MTBF beschreiben die mittlere Strecke bzw. Zeitspanne von der Reparatur der Komponente bis zu ihrem nächsten Ausfall [144]. Hinsichtlich der Komponenten von konventionellen Antriebssträngen (ICE-D, ICE-NG) wurden diese im Rahmen einer Literaturrecherche und mittels Expertengesprächen festgelegt. MDBF und Preise der Reifen wurden der Fachliteratur entnommen [63]. Entsprechend der ECE Regelung Nr. 110 ist die Lebensdauer des Speicherbehälters von Erdgas vom Hersteller festzulegen und variiert in Abhängigkeit der Verwendung. Eine Mindestlebensdauer von 15.000 Betankungsvorgängen wird dem Modell zugrunde gelegt [145]. Die Batterie von Hybridfahrzeugen ohne die Funktionalität des rein batterieelektrischen Fahrens (MHEV), wird in Mikrozyklen um einen bestimmten SOC-Wert betrieben. Nach [146] ist der Lebensdauereinfluss dieser Mikrozyklen auf das Batteriesystem nur marginal. Daher wird bei MHEV-Fahrzeugen der Austausch des Batteriesystems nach der gewährten Herstellergarantie in Jahren und somit laufleistungsunabhängig vorgesehen. Gleiches gilt für das Batteriesystem des Brennstoffzellenfahrzeuges. Derzeit wird herstellerübergreifend eine Garantie von acht Jahren für das Batteriesystem gewährt [147]–[150]. Die Verminderung des Verschleißes des Bremssystems bei Hybridkonzepten erfolgt unter Berücksichtigung des in Kapitel 3.1.2 eingeführten Hybridisierungsfaktors η_{HF} :

$$MDBF_{k,i,j}^* = MDBF_{k,i,j} \cdot \frac{1}{\eta_{HF}} \quad (32)$$

Analog zur beschriebenen Vorgehensweise werden bei FHEV, PHEV und REEV die MDBF der Kategorie Hubkolbenmotor in Abhängigkeit des verbrennungsmotorischen Fahranteils $\eta_{CS-Modus}$ erhöht:

³¹ Vereinfachend wird zugrunde gelegt, dass die Mean Time to First Failure (MTTF) der Mean Time Between Failure (MTBF) entspricht und diese jeweils konstant bleibt.

$$MDBF_{k,i,j}^* = MDBF_{k,i,j} \cdot \frac{1}{\eta_{CS-Modus}} \quad (33)$$

Dies entspricht ebenso der Vorgehensweise vorgestellt in [146]. Bei Fahrzeugen mit der Funktionalität des rein elektrischen Fahrens wird unterstellt, dass diese von Fahrtbeginn bis zum Erreichen des minimalen Ladezustandes im CD-Mode betrieben werden [151]. Die Zyklenzahl des Batteriesystems ergibt sich damit über das Verhältnis des elektrischen Gesamtfahrleistungsanteils in Kilometern und der elektrischen Reichweite eines Fahrzeugkonzeptes. Wie im Rahmen von Kapitel 3.1.2 innerhalb Tabelle 3.3 aufgeführt, beträgt die Zyklenzahl von Hochenergiesystemen 3.100 Zyklen. Die MTBF der Leistungselektronik und der elektrischen Maschine wird vereinfachend mit 10.000 Betriebsstunden abgeschätzt [152]. Die Betriebsstunden werden über das Verhältnis der Gesamtfahrleistung und der durchschnittlichen Geschwindigkeit des zugrunde liegenden Zyklus bestimmt. Entsprechend der Analyse verschiedener Produktdatenblätter beträgt die Lebensdauer von Brennstoffzellensystemen 10.000 Betriebsstunden (siehe Kapitel 3.1.2, Tabelle 3.6). Für das Wasserstofftanksystem wird eine Lebensdauer von 5.000 Betankungszyklen zugrunde gelegt [90]. Eine detaillierte Auflistung der berücksichtigten Komponenten bzgl. der Instandsetzung kann dem Anhang D, der Tabelle D.3, entnommen werden.

Nach § 29 StVZO sind Halter von zulassungspflichtigen Fahrzeugen dazu verpflichtet, die Fahrzeuge in regelmäßigen Zeitabständen untersuchen zu lassen [102]. Im Rahmen der Hauptuntersuchung (HU) und der Sicherheitsprüfung (SP) wird die Vorschriftenmäßigkeit und Sicherheit von Verkehrsmitteln nach den Anlagen VIII und VIIIa der StVZO sichergestellt. Die Umweltverträglichkeit wird über § 47 StVZO und der darin verpflichtenden Abgasuntersuchung (AU), welche im Rahmen der Hauptuntersuchung stattfindet, geprüft. Bei Fahrzeugen mit Druckgastanks ist in regelmäßigen Abständen zusätzlich eine Dichtheitsprüfung (LT) und eine Druckprüfung (PT) durchzuführen [145]. Damit ergeben sich die jährlichen Inspektionskosten $INSK_{i,j}^a$ in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments i und des Antriebskonzeptes j zu:

$$\begin{aligned}
 INSK_{i,j}^a &= \frac{INSK_{i,j}^{ges}}{FL^{ges}} \cdot FL^a \\
 &= \left[\frac{a^{HU} \cdot KS^{HU} + a^{SP} \cdot KS^{SP} + a^{AU} \cdot KS^{AU} + a^{LT} \cdot KS^{LT} + a^{PT} \cdot KS^{PT}}{FL^{ges}} \right] \cdot FL^a \quad (34)
 \end{aligned}$$

$$\text{mit } a^{HU} = \left\lfloor \frac{h \cdot 12}{I_{i,j}^{HU}} \right\rfloor, a^{SP} = \left\lfloor \frac{h \cdot 12}{I_{i,j}^{SP}} \right\rfloor, a^{AU} = \left\lfloor \frac{h \cdot 12}{I_{i,j}^{AU}} \right\rfloor, a^{LT} = \left\lfloor \frac{h \cdot 12}{I_{i,j}^{LT}} \right\rfloor, a^{PT} = \left\lfloor \frac{h \cdot 12}{I_{i,j}^{PT}} \right\rfloor$$

In Abhängigkeit der einzelnen Intervalle und unter Berücksichtigung der Fahrzeughaltedauer h wird die Anzahl a der erforderlichen Inspektionen (HU, SP, AU, LT und PT) ermittelt. Das Ergebnis wird auf eine natürliche Zahl abgerundet, da für die restliche Nutzungsdauer keine weiteren Kosten anfallen. Die über die Haltedauer anfallenden Inspektionskosten $INSK_{i,j}^{ges}$ werden mittels der Kostensätze KS der jeweiligen Prüfung und unter Berücksichtigung der Anzahl an erforderlichen Inspektionen berechnet. Die entsprechenden Kostensätze und Intervalle können dem Anhang D, der Tabelle D.4, entnommen werden.

4.4.2 Abschätzung von Restwerten

Der Restwert eines Fahrzeuges entspricht dem erzielbaren Verkaufserlös abzüglich Demontage- und Veräusserungskosten. Dieser mindert, wie in Gleichung (19) aufgezeigt, die RCO. Bisher ist keine umfassende Analyse von Restwerten alternativer Nutzfahrzeuge bekannt, was die Entwicklung einer multikriteriellen Abschätzung von Restwerten für alternative Antriebstechnologien bedingt. Hierfür werden das Fahrzeugsegment, das entsprechend zulässige Gesamtgewicht, die Antriebsstrangtechnologie, die Investitionskosten, die Gesamtleistung, die Infrastrukturdichte und der Reifegrad der Technologie als ausschlaggebende Faktoren erachtet.

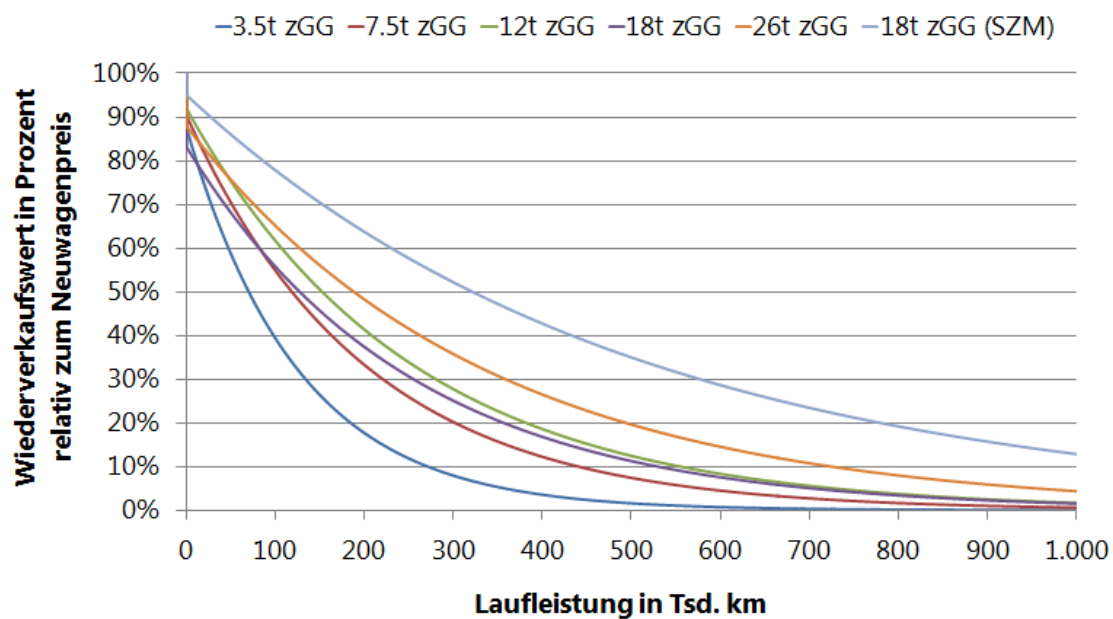
Mittels einer Regressionsanalyse auf Basis des DAT Marktspiegels (Winter 2015/2016) [153] wurde der funktionale Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Neupreis und dem durchschnittlichen Händlerverkaufswert unter Berücksichtigung der

Gesamtfahrstrecken für ausgewählte³² Fahrzeugmodelle, die dem EUR VI Emissionsstandard entsprechen, bestimmt. Da es sich bei Nutzfahrzeugen um ein Investitionsgut zur Erbringung von Dienstleistungen handelt, wird vorausgesetzt, dass die Wertminderung in hohem Maße durch die Abnutzung, im Sinne gefahrener Kilometer, beeinflusst ist. Das Fahrzeugalter wird dabei implizit berücksichtigt, da die berücksichtigte Gesamtfahrleistung sich aus dem Produkt der jährlichen Fahrleistung mit der Haltedauer³³ ergibt. Die Analyseergebnisse und die funktionalen Zusammenhänge können Abbildung 4.7 entnommen werden. Die kleinstmögliche Abweichung wurde jeweils mit einer exponentiellen Regression erzielt.

³² Die Fahrzeugauswahl umfasst die gängigen Modelle der ersten drei Hersteller mit den höchsten Neuzulassungszahlen. Bzgl. Fahrzeugen der Klasse N₁ sind dies: Daimler, Volkswagen und Ford. Bzgl. Fahrzeugen der Klasse N₂ und N₃ sind dies: Daimler, MAN und IVECO.

³³ Es werden ausschließlich Neuzulassungen betrachtet, weshalb die Haltedauer somit immer dem Alter des Fahrzeuges entspricht.

Abbildung 4.7: Wertverlustverlauf konventioneller Fahrzeugkonzepte in Prozent (relativ zum Anschaffungspreis) über die Laufleistung für verschiedene Fahrzeugsegmente



Fahrzeugsegment	Parameter der Exponentialfunktion: $f(x) = \lambda \cdot \text{EXP}(\beta \cdot x)$		
	λ	β	R^2
3,5t zGG	8,79E-01	-8,00E-03	0,94
7,5t zGG	9,06E-01	-5,00E-03	0,98
12t zGG	9,22E-01	-4,00E-03	0,99
18t zGG	8,33E-01	-4,00E-03	0,95
26t zGG	8,80E-01	-3,00E-03	0,96
18t zGG (SZM)	9,51E-01	-2,00E-03	0,99

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Wertverlust vom zulässigen Gesamtgewicht und somit vom Fahrzeugsegment abhängt. Mit steigendem Gesamtgewicht sind die Fahrzeuge wertstabiler, was sich in einer geringeren Krümmung der Regressionsfunktion äußert.

Da keine mathematisch-statistisch genauen Angaben zu Wertverlusten von alternativen Antriebstechnologien bei Nutzfahrzeugen verfügbar sind, wird dieser auf Basis der Wertverlustverläufe konventioneller Fahrzeuge und mittels Fuzzylogik bestimmt. Formal wird der Restwert von Fahrzeugkonzepten nach Gleichung (35), in Abhängigkeit der Investitionskosten und der gesamten Fahrleistung ermittelt.

$$RW_{i,j}^F = IK_{i,j}^F \cdot \lambda_i \cdot e^{\left(\frac{\beta_i}{\varepsilon_{i,j}} FL^{\text{ges}}\right)} \quad (35)$$

$\lambda_{i,j}$ und $\beta_{i,j}$ entsprechen dabei den auf Basis des DAT-Datensatzes bestimmten und fahrzeugsegmentabhängigen Level-Parametern. Um zusätzlich zu konventionellen Fahrzeugkonzepten auch alternative Fahrzeugkonzepte zu berücksichtigen wird nun ein Skalierungsfaktor $\varepsilon_{i,j}$ eingeführt³⁴. Grundlegend wird demnach stets ein exponentieller Funktionsverlauf unterstellt, welcher sich mit steigendem Skalierungsfaktor dem Funktionsverlauf konventioneller Fahrzeugkonzepte angleicht. Der Skalierungsfaktor wird mittels der Fuzzylogik bestimmt. Fuzzylogik wird bei Problemstellungen zur Abbildung von Vagheit und Unsicherheit herangezogen, sofern keine mathematisch-statistisch genaue Angabe von Ausgangsdaten verfügbar ist [131]. Auf der Basis einer verbalen Beschreibung (heuristischer Inferenzregeln) eines Sachverhaltes wird mittels Fuzzylogik eine mathematische Beschreibung gewonnen, die es ermöglicht, den Sachverhalt zu quantifizieren. Die Ermittlung des Skalierungsfaktors basiert auf Basis von zwei Fuzzy-Variablen, die durch die folgenden Hypothesen begründet werden:

- *Infrastrukturdichte*: Die Infrastrukturdichte beschreibt zum einen die Netzabdeckung installierter Lade- bzw. Betankungseinheiten. Zum anderen umfasst diese die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und damit die Größe eines Aftermarkts. Sind beide Faktoren gering ausgeprägt, ist zu erwarten, dass potentielle Käufer nicht bereit sind, einen zum konventionellen Antriebsstrang vergleichbaren Wiederverkaufswert zu bezahlen. Hieraus folgt: Je geringer die Infrastrukturdichte, desto geringer ist der zu erzielende Wiederverkaufswert. Die Grundmenge der Fuzzy-Variable Infrastrukturdichte ist das Intervall [0,1]. Der Wertebereich drückt einen Erfüllungsgrad aus. Ein Wert nahe eins deutet auf eine hohe Infrastrukturdichte hin.

³⁴ bezüglich des Antriebskonzeptes ICE-D gilt stets: $\beta_{i,j} = 1$

- *Reifegrad der Technologie:* Der Reifegrad einer Technologie wird als Indikator für die aktuelle Leistungsfähigkeit im Sinne des Entwicklungsstatus einer Technologie angesehen. Beispielsweise wird bei einer Schrittmachertechnologie die Weiterentwicklungsdynamik als hoch angesehen, was in einer dynamischen Entwicklung der Leistungsfähigkeit resultiert. Hieraus folgen kurze Technologizeyklen und schnelle Alterungsprozesse, die eine Absenkung des Restwertes erwarten lassen. Die Grundmenge der Fuzzy-Variable Reifegrad der Technologie ist das Intervall $[0,1]$. Ein Wert nahe eins deutet auf eine Technologie mit einem hohen Reifegrad hin.

Die Fuzzy-Variablen umfassen eine Anzahl an Termen, die in einem ersten Schritt (Fuzzyfizierung) mit linguistischen Werten belegt werden und über eine Zugehörigkeitsfunktion definiert sind. Für den Reifegrad der Technologie sind die gewählten linguistischen Terme³⁵: Schrittmacher-, Schlüssel- und Basistechnologie. Für die Infrastrukturdichte werden die linguistischen Terme sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch verwendet. In einem zweiten Schritt (Inferenz) werden mittels Inferenzregeln, in Form von Wenn-Dann-Beziehungen, die Eingangsparameter verkettet und auf ein Ausgangsset übertragen. Im abschließenden und dritten Schritt wird das ermittelte Ausgangsset in den quantitativen Skalierungsfaktor $\varepsilon_{i,j}$ umgewandelt (Defuzzyfizierung).

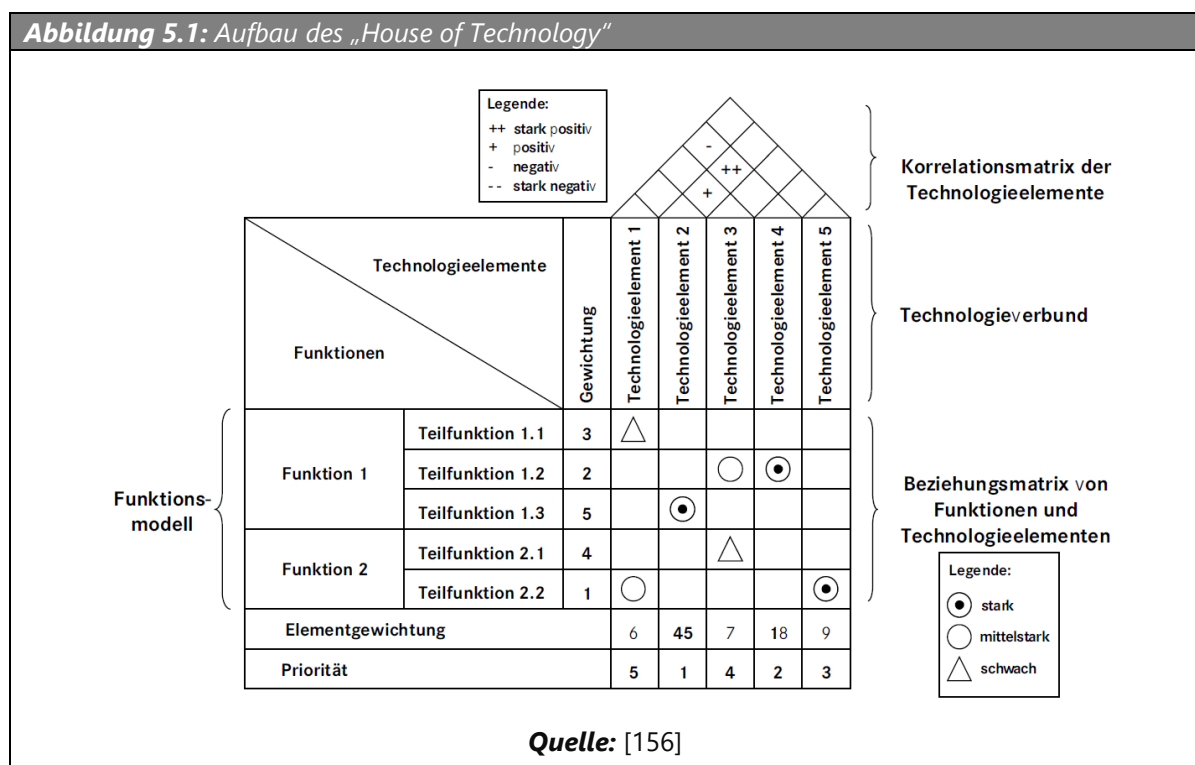
³⁵ Linguistische Terme werden in der Literatur auch als Fuzzy-Sets bezeichnet. Fuzzy-Sets geben für jeden numerisch, scharfen Wert eines Eingangsparameters den dazugehörigen Erfüllungsgrad einer fuzzy-logischen Aussage an [154].

5 Nutzwertanalyse zukünftiger Technologieelemente mithilfe der Methode des „House of Technology“

Die Kraftstoffkosten beeinflussen in hohem Maße die RCO von Nutzfahrzeugkonzepten. Diese betragen bis zu ca. 30 % der laufenden Kosten und stellen neben den Personalkosten einen wesentlichen Kostenfaktor dar [72], [155]. Der Energieverbrauch und damit verbunden auch die CO₂-Emissionen variieren jedoch in Abhängigkeit verschiedener Faktoren wie z.B. des Einsatzprofils, des Antriebskonzeptes, des Beladungszustands, der Fahrzeugkonfiguration, der Fahrzeugcharakteristik etc. Auch sind die Potentiale zur Reduktion des Streckenverbrauchs von zukünftigen Technologieelementen abhängig von den soeben genannten Faktoren. Dem potentiellen Fahrzeugkäufer stehen mehrerer Handlungsalternativen zur Wahl, um den Energieverbrauch eines Fahrzeugkonzeptes zu optimieren. Jedoch ist die Markttransparenz beeinträchtigt und resultiert darin, dass potentielle Käufer nicht in der Lage sind, unterschiedliche Leistungen von Neufahrzeugen zu vergleichen. Begründet ist dies dadurch, dass die CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen weder gemessen noch gemeldet werden [6]. Die erforderliche Vergleichbarkeit konkurrierender Antriebsstrangkonzepete von Nutzfahrzeugen stellt das im Rahmen von Kapitel 4 entwickelte techno-ökonomische Bewertungsmodell sicher. Das Ziel dieses Kapitels ist es, anwendungsspezifische Potentiale von zukünftigen Technologieelementen zur Reduktion des Energieverbrauchs zu bestimmen und das komplexe Bewertungsproblem von Technologieelementen zu strukturieren, um eine rationale Bewertung durch den Käufer zu erleichtern. Fokussiert wird dabei auf die, dem Stand der Technik (siehe hierzu Kapitel 3) nachfolgenden Einzel- und Systemtechnologien³⁶ hinsichtlich der Kategorien: Antriebsstrang, Aerodynamik, Leichtbau, Reifen und Räder und Sonstiges. Hierzu erfolgt die Ermittlung von Nutzwerten für einzelne Technologieelemente mithilfe der Methode des „House of Technology“ (HoT) unter zusätzlicher Berücksichtigung der Effizienz eines Technologieelementes.

³⁶ Unter Systemtechnologie wird ein komplexes Bündel von Einzeltechnologien verstanden, wobei etwaige Wechselwirkungen in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Die Methode des HoT geht aus der Methode des „*Quality Function Deployment*“ (QFD) hervor. Anstelle der Bewertung von Anforderungen und technischen Merkmalen wird in einer Relationsmatrix die Beziehung zwischen zu erfüllenden Produktfunktionen und verschiedenen Technologieelementen abgebildet (siehe Abbildung 5.1). Dies ermöglicht die Berücksichtigung funktionaler Abhängigkeiten und möglicher Interdependenzen mit dem Ziel, passende Lösungsbündel zu identifizieren. Die Relationsmatrix ergibt sich anhand der Zuordnung der zu erfüllenden Funktionen mit identifizierten Technologieelementen (Lösungsansätzen). Im Rahmen dieser Zuordnung erfolgt eine Kennzeichnung und Gewichtung bestehender Korrelationen. Im „*Dach*“ des HoT ist eine weitere Korrelationsmatrix, die es ermöglicht, die gegenseitigen Wechselwirkungen der Technologieelemente zu berücksichtigen. Auf Basis der vorgenommenen Gewichtungen und Beziehungsstärken lassen sich die jeweiligen Technologieelemente priorisieren [156].



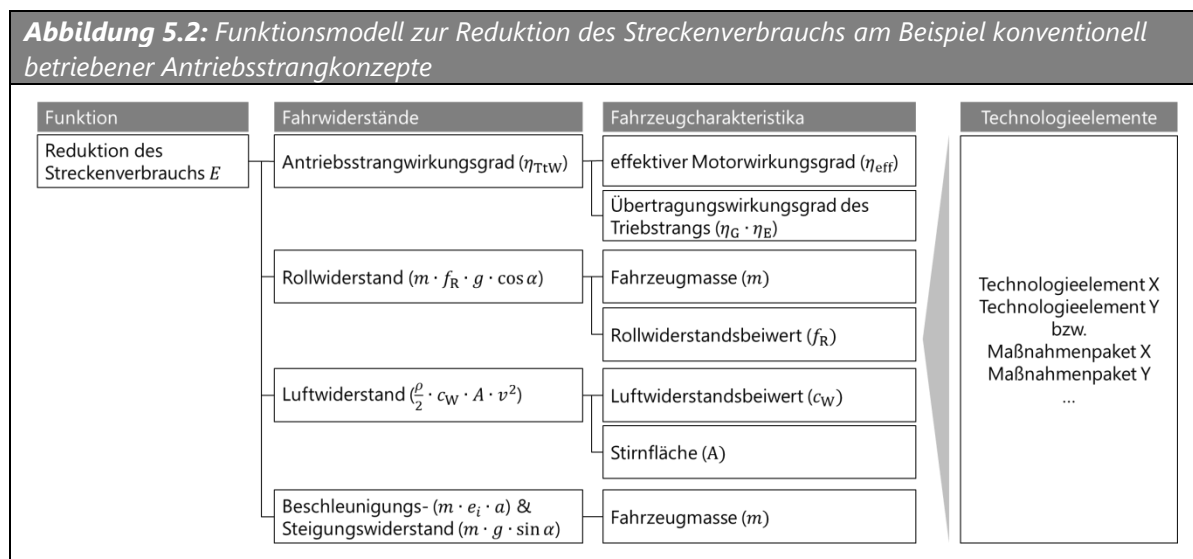
Die Technologieeffizienz T_n^{TE} dient der wirtschaftlichen Bewertung verschiedener Technologieelemente n . Diese wird gemäß Gleichung (36) über das Verhältnis des

technologiespezifischen Potentials zur Reduktion des Streckenverbrauchs RP_n^{TE} in Prozent und den Herstellkosten eines Technologieelementes HK_n^{TE} definiert [157].

$$T_n^{\text{TE}} = \frac{RP_n^{\text{TE}}}{HK_n^{\text{TE}}} \quad (36)$$

5.1 Erstellung eines Funktionsmodells

Zur Anwendung des HoT wird ein Funktionsmodell benötigt. Dieses beschreibt die Zusammenhänge einzelner Technologieelemente hinsichtlich ihres Einflusses auf die zu erfüllenden Funktionen. Übertragen auf die Bewertung von zukünftigen Technologieelementen von Nutzfahrzeugen mit konkurrierenden Antriebsstrangkzepten stellt die zu erfüllende Funktion die Reduktion des Streckenverbrauchs dar. Technologieelemente wirken auf den Streckenverbrauch über den Einfluss auf die inneren und äußeren Fahrwiderstände. Das der Analyse zugrunde liegende Funktionsmodell zur Reduktion des Streckenverbrauchs für konventionell betriebene Antriebsstrangkzepten zeigt Abbildung 5.2.



5.2 Spezifikation und Charakterisierung des Technologieportfolios

Wie zu Beginn von Kapitel 5 erwähnt, variiert der Energieverbrauch in Abhängigkeit verschiedenster Faktoren. Durch Modellsimulationen zur Ermittlung des Energiever-

brauchs (siehe hierzu Kapitel 4.3) werden nicht nur die Vergleichbarkeit verschiedener Antriebskonzepte, sondern auch die Vergleichbarkeit verschiedener Technologieelemente sichergestellt sowie deren anwendungsspezifische Reduktionspotentiale bestimmt. Für die Ermittlung der anwendungsspezifischen Reduktionspotentiale einzelner Technologieelemente ist eine geeignete technische Charakterisierung dieser erforderlich. Zur Durchführung der Nutzwertanalysen wird darüber hinaus eine Angabe zu den Herstellungskosten benötigt. Weiterhin erfolgt eine Berücksichtigung des technologischen Reifegrades.

Die technische Charakterisierung der Technologieelemente der konventionellen Antriebstränge basieren zum einen auf den Erkenntnissen der Metaanalyse hinsichtlich des Verbrauchsreduktionspotentials und der Herstellungskosten verschiedener Einzeltechnologien und Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs (siehe hierzu Anhang E, Tabelle E.1, Tabelle E.2 und Tabelle E.3) und zum anderen auf den Erkenntnissen der Studie *„Commercial Medium- and Heavy-Duty Truck Fuel Efficiency Technology Study – Report #1“* des U.S. Department of Transportation [26]. Hinsichtlich des Antriebstrangs wird grundsätzlich eine Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades von Getriebe und Endantrieb durch z.B. Schmiermittelloptimierung um ein Prozent unterstellt. Die dieselmotorischen Entwicklungen umfassen neben der Optimierung des Verbrennungsprozesses z.B. durch die Verringerung der Zündverzugszeit und eine effizientere Aufladung, Reibungsreduktion, Downspeeding durch optimierte Aufladungskonzepte, SCR-only Konzepte auch neue Brennverfahren wie z.B. Niedertemperatur-Verbrennung. Betrachtete Entwicklungen des Erdgasmotors umfassen neben der Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. eine effizientere Aufladung und Reibungsreduktion auch optimierte Aufladungskonzepte und neue Brennverfahren wie z.B. Magerkonzept-Strahlgeführt. Aufgrund genannter Maßnahmen werden zukünftig effektive Motorwirkungsgrade im Bestpunkt von 52 % bezüglich Dieselmotoren und 48 % bezüglich Erdgasmotoren erreicht. Das Ziel bei Dieselmotoren ist es, durch sukzessive Prozessoptimierung einen effektiven Motorwirkungsgrad von 55 %

im Bestpunkt zu erreichen [17], [158]. Das Ziel bei Erdgasmotoren ist es, möglichst die effektiven Motorwirkungsgrade von Dieselmotoren zu erreichen [158]. Durch den Einsatz neuer Materialien wird eine Wirkungsgradsteigerung bezüglich der elektrischen Maschine im Lastbereich 1 um bis zu drei Prozent angenommen. Der Wirkungsgrad der Leistungselektronik wird durch den Einsatz neuer Materialien um ein Prozent gesteigert [159]. Lithium-Ionen Batteriesysteme der nächsten Generationen versprechen Wirkungsgradsteigerungen von bis zu fünf Prozent [160]. Durch die Erhöhung der Arbeitstemperatur und Optimierung sowohl des Wärmemanagements als auch der Peripheriekomponenten wird von einer Steigerung des realen Brennstoffzellensystemwirkungsgrades um bis zu neun Prozent ausgegangen [98].

Durch aerodynamische Technologien bzw. Maßnahmen wie z.B. Seitenverkleidung, Heckenzug, Umlenkschaufeln, Kastenwagenoptimierung und Aufliegerfrontverkleidung kann der dimensionslose Luftwiderstandsbeiwert je nach umgesetzter Maßnahme zwischen 0,02 und 0,12 reduziert werden (siehe Erkenntnisse der Metaanalyse im Anhang E, Tabelle E.4).

Durch Werkstoff-, Form- und Konzeptleichtbau wie z.B. ein verbessertes Komponenten-Design, die Erhöhung der Stahlqualität, vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen etc. variiert das Leichtbaupotential fahrzeugsegment- und kategorieübergreifend zwischen 10 kg und 2.506 kg (siehe Anhang E, Tabelle E.5).

Eine Verringerung des Rollwiderstandbeiwertes kann vor allem durch den Einsatz von Reifen der Effizienzklassen B und A erreicht werden. Je nach Reifenklasse wird ein Rollwiderstandsbeiwert von bis zu 4 ‰ erreicht (siehe Kapitel 3.4). Weitere mögliche Maßnahmen sind der Einsatz von Einzelbreitreifen anstelle von Zwillingsbereifung und der Einsatz eines Druckausgleichsystems (siehe Anhang E, Tabelle E.6).

Durch eine Steigerung der Autonomiestufe von Stufe 1 bis Stufe 5 (Definition nach SAE [161]) können, optimistischen Schätzungen zufolge, aufgrund einer effizienteren

Fahrweise, Verbrauchsreduktionspotentiale bis zu 20 % erschlossen werden [15]. Weiterhin ermöglichen kontinuierliche Fahrerschulungen und Anzeigeinstrumente mit Eco-Indikatoren Verbrauchsreduktionspotentiale bis zu 10 % (siehe Anhang E, Tabelle E.7).

Jede für die weitere Analyse betrachtete Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz von Nutzfahrzeugen ist im Allgemeinen mit zusätzlichen Kosten verbunden. Sofern möglich wurde je berücksichtigtem Technologieelement eines Technologieportfolios der Median basierend auf der durchgeführten Metanalyse hinsichtlich der Verbrauchsreduktionspotentiale und der Herstellungskosten verschiedener Einzeltechnologien und Maßnahmen (siehe hierzu Anhang E, Tabellen E.1 bis E.7) herangezogen. Andernfalls erfolgt basierend auf den Erkenntnissen der Metaanalyse eine vereinfachte Abschätzung. Hinsichtlich der antriebsstrangspezifischen Maßnahmen im CD-Fahrmodus sind keine Kostenangaben verfügbar. Hierbei wird vereinfachend unterstellt, dass diese im Zuge der technologischen Optimierung und einer gewünschten Marktdurchdringung nicht an den Kunden weitergegeben werden und damit kostenneutral sind.

Der technologische Reifegrad bzw. die Evolutionsstufe eines Technologieelements definiert dessen zeitliche Verfügbarkeit. Es werden drei Evolutionsstufen unterschieden, wobei sich die zeitliche Schrittweite zwischen leichten und schweren Nutzfahrzeugen unterscheiden. So wird der Entwicklungsprozess bei leichten Nutzfahrzeugkonzepten mit fünf Jahren und der Entwicklungsprozess bei schweren Nutzfahrzeugkonzepten mit zehn Jahren antizipiert. Dies wird dadurch begründet, dass leichte Nutzfahrzeuge von der schnellen Entwicklung bei Personenkraftwagen profitieren. Geringere Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen sowie eine höhere Lebensdaueranforderung bei schweren Nutzfahrzeugen führen hingegen zu einem längeren Entwicklungsprozess. So sind Technologieelemente der Evolutionsstufe 1 segmentübergreifend bereits zum Jahr 2015 am Markt verfügbar. Elemente der Evolutionsstufe 2 befinden sich im Jahr 2017 in der Vorentwicklung und sind für LNF je nach Ele-

ment ab dem Jahr 2020 oder 2025 verfügbar. Für SNF sind Technologieelemente der Evolutionsstufe 2 ab dem Jahr 2025 verfügbar. Elemente der Evolutionsstufe 3 befinden sich im Jahr 2017 im Forschungsstadium und sind für LNF je nach Element ab dem Jahr 2030 oder 2035 verfügbar. Für SNF sind Technologieelemente der Evolutionsstufe 3 ab dem Jahr 2035 verfügbar.

Jedes Fahrzeugsegment verfügt über ein Technologieportfolio (siehe Anhang F, Tabellen F.1 bis F.18). Dieses umfasst dem Stand der Technik nachfolgende Einzel- und Systemtechnologien (Technologieelemente) zur Reduktion des Streckenverbrauchs. Spezifiziert sind diese hinsichtlich der Kategorien Antriebsstrang, Aerodynamik, Leichtbau, Reifen und Räder und Sonstiges. Abgeleitet sind diese auf Basis der zuvor erwähnten und durchgeführten Metaanalyse hinsichtlich des Verbrauchsreduktionspotentials und der Herstellungskosten verschiedener Einzeltechnologien und Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs (siehe hierzu Anhang E, Tabellen E.1 bis E.7).

5.3 Anwendungsspezifische Ermittlung des Potentials zur Reduktion des Streckenverbrauchs betrachteter Technologieelemente

Die anwendungsspezifischen Reduktionspotentiale der Technologieelemente des je Fahrzeugsegment zugrunde liegenden Technologieportfolios werden mittels Modellsimulation³⁷ unter Berücksichtigung der technischen Charakterisierung der Technologieelemente³⁸, des Einsatzprofils, des Antriebskonzeptes, des Beladungszustands, der Fahrzeugkonfiguration und der Fahrzeugcharakteristik bestimmt. Die ermittelten Reduktionspotentiale beziehen sich auf den jeweiligen Streckenverbrauch des Basisfahrzeuges, die dem im Rahmen von Kapitel 3 definierten Stand der Technik entsprechen. Die Ermittlung des Reduktionspotentials kann dabei ausschließlich für Technologieelemente der Kategorien Antriebsstrang, Aerodynamik, Leichtbau sowie Reifen und

³⁷ Die Ermittlung des Potentials zur Reduktion des Streckenverbrauchs je Technologieelement basiert auf der im Rahmen von Kapitel 4.3 erläuterten Vorgehenssystematik.

³⁸ siehe hierzu Anhang F, Tabellen F.1 bis F.18

Räder erfolgen. Die einzelnen Funktionen der verschiedenen Autonomiestufen sowie das Fahrerverhalten sind im Rahmen der verwendeten Vorgehenssystematik zur Ermittlung des Energieverbrauchs nicht abbildbar. Daher wird diesbezüglich der Median basierend auf den Erkenntnissen der Metaanalyse hinsichtlich des Verbrauchsreduktionspotentials und der Herstellungskosten verschiedener Einzeltechnologien und Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs fahrzyklusübergreifend herangezogen.

Grundsätzlich zeigt sich, dass sich die Grenzen der Reduktionspotentiale bezüglich der einzelnen Technologieelemente des konventionellen Antriebsstrangs nur geringfügig in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Fahrzyklus unterscheiden. In Abhängigkeit des Antriebskonzeptes variieren die ermittelten Potentiale fahrzeugsegment- und antriebsstrangkonzepübergreifend zwischen 0,1 % und 27,6 %. Bezüglich der Technologieelemente der alternativen Antriebstränge PHEV, BEV/REEV und FCEV ergeben sich die höchsten Reduktionspotentiale unter Zugrundelegung eines urbanen Fahrzyklus. Fahrzyklusübergreifend liegen die ermittelten Potentiale bezüglich der Technologieelemente des batterieelektrischen Antriebspfades von PHEV- und BEV/REEV-Konzepten zwischen 0,9 % und 23,2 %. Für den brennstoffzellenelektrischen Antriebspfad liegen die Reduktionspotentiale der Technologieelemente zwischen 10,6 % und 27,6 %. Technologieelemente der Kategorie Aerodynamik besitzen mit steigender Durchschnittsgeschwindigkeit höhere Reduktionspotentiale. Diese variieren zwischen Einsparungspotentialen von 0 % und 11,5 %. Je geringer die Durchschnittsgeschwindigkeit desto höher ist der Masseeinfluss. Die Reduktionspotentiale aufgrund von Leichtbaumaßnahmen variieren dabei zwischen 0,1 % und 19,7 %. Die Optimierung des Rollwiderstandes ermöglicht Reduktionspotentiale zwischen 1,5 % und 17,0 %. Eine kontinuierliche Fahrerschulung ermöglicht ein Reduktionspotential von 5,0 %. In Abhängigkeit der Autonomiestufe wird von Reduktionspotentialen in Höhe von 5,5 % bis 17,5 % ausgegangen. Eine Zusammenfassung der soeben genannten Bandbreiten der anwendungsspezifischen Reduktionspotentiale der betrach-

teten fahrzeugsegment- und antriebsstrangkonzzeptübergreifenden Technologieelementen beinhaltete Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Bandbreiten der anwendungsspezifischen Reduktionspotentiale der betrachteten fahrzeugsegment- und antriebsstrangkonzzeptübergreifenden Technologieelementen

Kategorie	Technologieelemente	LNF					
		WLTP_urban		WLTP_regional		WLTP_Autobahn	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Antriebsstrang	Diesel#1-7	2,8%	14,2%	3,2%	14,0%	3,2%	13,9%
	Erdgas#1-6	2,2%	13,1%	2,3%	13,2%	2,1%	13,3%
	PHEV-CD#1-2	5,6%	10,4%	3,6%	7,4%	0,9%	3,3%
	BEV/REEV#1-2	12,4%	20,4%	10,6%	17,5%	8,3%	13,6%
	FCEV#1-2	14,0%	22,7%	12,2%	20,3%	10,6%	18,2%
Aerodynamik	Kastenwagenoptimierung#1-2	0,4%	2,3%	2,9%	6,9%	5,9%	11,5%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1-6	1,0%	18,3%	0,8%	12,5%	0,1%	7,2%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1-2	1,5%	8,3%	2,3%	7,6%	1,7%	6,4%
Kategorie	Technologieelemente	SNF					
		WHVC_urban		WHVC_regional		WHVC_Autobahn	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Antriebsstrang	Diesel#1-8	2,8%	17,2%	3,0%	17,1%	3,0%	16,9%
	Erdgas#1-6	4,3%	15,6%	4,5%	15,5%	4,6%	15,9%
	PHEV-CD#1-2	7,9%	14,1%	4,6%	8,8%	2,8%	5,5%
	BEV/REEV#1-2	12,5%	23,2%	9,6%	19,1%	8,0%	15,0%
	FCEV#1-2	15,3%	27,6%	12,7%	23,7%	10,8%	21,1%
Aerodynamik	Lkw/SZ#1-8	0,0%	1,8%	0,0%	3,6%	1,2%	6,1%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1-6	0,7%	19,7%	0,3%	16,3%	0,4%	9,1%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1-2	2,2%	12,3%	2,6%	11,9%	3,5%	17,0%
Sonstiges	Autonomiestufe#1-5	5,5%	17,5%	5,5%	17,5%	5,5%	17,5%
	Fahrschulung	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%

Quelle: eigene Analyse

Die Reduktionspotentiale der betrachteten Technologieelemente wurden für alle Fahrzeugsegmente und betrachteten Antriebskonzepte³⁹ separat ermittelt. Beispielhaft sind die ermittelten Reduktionspotentiale der einzelnen Technologieelemente des Technologieportfolios für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept je Fahrzeugsegment dem Anhang G, Tabellen G.1 bis G.6, angefügt.

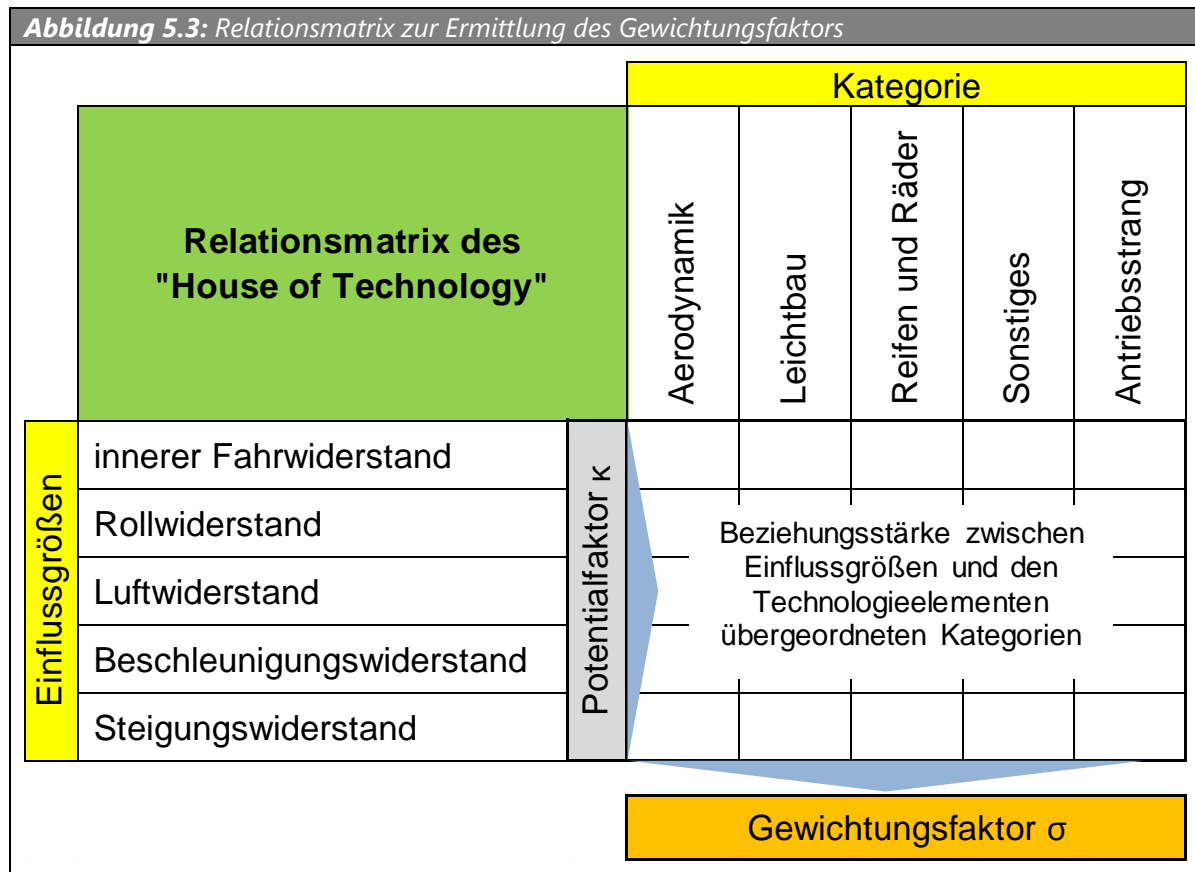
³⁹ Hinsichtlich der betrachteten Antriebskonzepte und deren Basis-Energieverbräuche wird auf die Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.2 verwiesen.

5.4 Vorgehensweise zur Ermittlung der Nutzwerte von Technologieelementen des Technologieportfolios

Zweck des Nutzwertes ist die vornehmliche Fokussierung auf Technologieelemente mit besonders hohem Nutzen unter Berücksichtigung des jeweiligen Anwendungsfalls. Je größer der Nutzwert je höher ist der Nutzen eines Technologieelementes. Zur Ermittlung des Nutzwertes $N(n)$ eines Technologieelementes n wird die Technologieeffizienz T_n^{TE} (siehe Gleichung (36)) eines Technologieelementes herangezogen und unter Berücksichtigung der jeweiligen Relevanz für die vorliegende Transportaufgabe gewichtet:

$$N(n) = \sigma \cdot T_n^{\text{TE}} \quad (37)$$

Der Gewichtungsfaktor σ wird hierfür über das HoT bestimmt. Eine Relationsmatrix verknüpft die Einflussgrößen mit den Technologieelementen übergeordneten Kategorien (siehe hierzu Abbildung 5.3).



Dabei ist die Beziehungsstärke zwischen den Einflussgrößen und den Kategorien mittels einer nichtlinearen Skala⁴⁰ von 0 (gering) über 3 (mittel) bis 9 (hoch) zu definieren. Der Gewichtungsfaktor je Kategorie resultiert aus der Produktsumme des Potentialfaktors κ je Einflussgröße und der Beziehungsstärke je Kategorie und Einflussgröße. Hinsichtlich der Einflussgrößen Rollwiderstand, Luftwiderstand, Beschleunigungswiderstand und Steigungswiderstand wird der Potentialfaktor unter Berücksichtigung des Fahrwiderstandsanteils bestimmt. Je größer der Fahrwiderstandsanteil, desto größer jeweils das Potential bzw. der Einfluss einer der zuvor genannten Kategorie zur Reduktion des Energieverbrauchs. Bezüglich der Einflussgröße Antriebsstrang wird das Potential in Abhängigkeit des Wirkungsgrades und eines maximal erreichbaren Grenzwertes bestimmt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass mit zunehmender Annäherung an diesen Grenzwert das weitere Verbesserungspotential abnehmend ist, wobei die Kosten zur Ausschöpfung des Potentials exponentiell zunehmen. Je höher das Verhältnis zwischen dem Wirkungsgrad des Antriebsstrangkzeptes und dem Antriebsstrangkzept zugrunde liegenden Grenzwert, desto geringer ist der Potentialfaktor.

⁴⁰ Die gewählte nichtlineare Skalierung ermöglicht eine deutliche Differenzierung einzelner Kategorien und erhöht damit die Aussagekraft.

6 Entwicklung eines Szenariomodells für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland

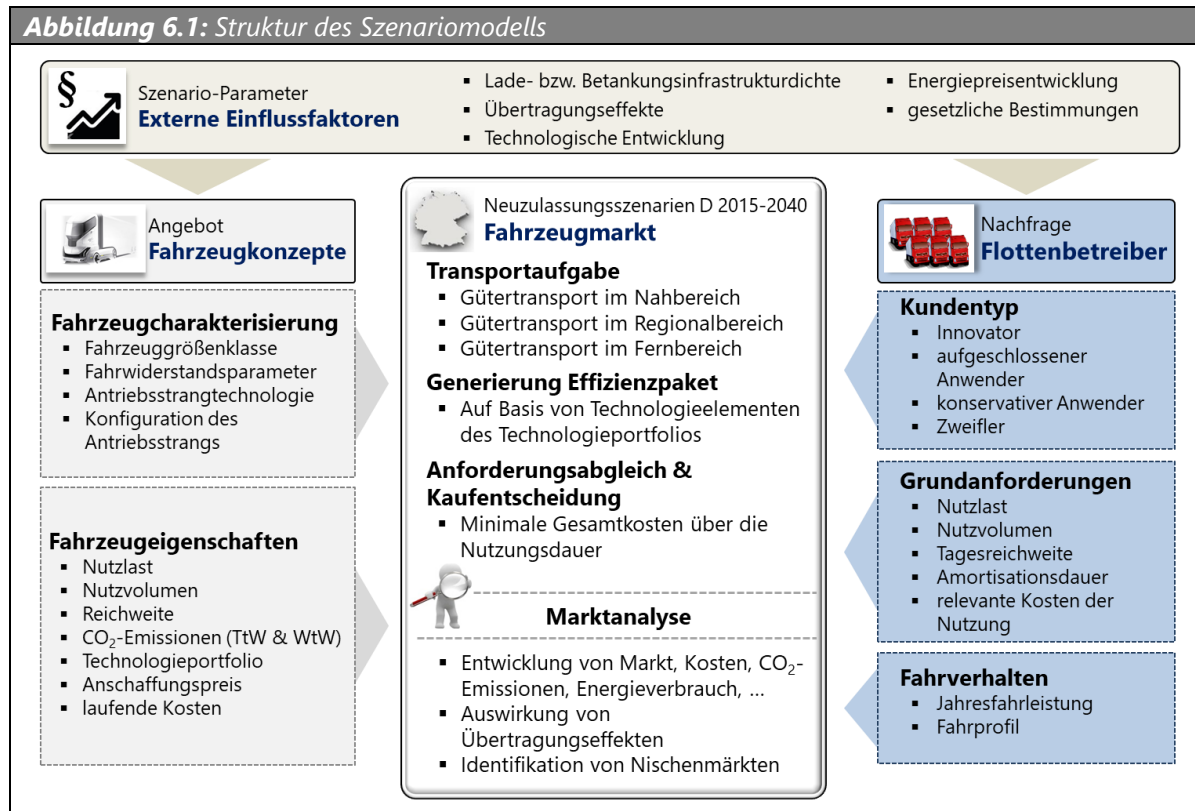
Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Durchführung umfassender Szenarioanalysen zur Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes in Deutschland. Daraus werden fundierte Handlungsempfehlungen für eine zukünftige Entwicklung alternativer Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge abgeleitet. Die im Rahmen von Kapitel 1.1 durchgeführte Analyse zum wissenschaftlichen Diskurs verdeutlicht, dass die Marktdiffusion alternativer Antriebs-technologien bei Nutzfahrzeugen nur vereinzelt adressiert und dabei der antriebs-technologische und ökonomische Kontext simplifiziert und sehr eingeschränkt abgebildet werden. Weiterhin werden bisherige Analysen einer umfassenden Betrachtung des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes nicht gerecht. Somit ist es erforderlich, ein Szenariomodell zu entwickeln, dass zum einen den technologischen und ökonomischen Kontext vertieft betrachtet und zum anderen die für eine umfassende Analyse erforderlichen Merkmale (siehe hierzu Kapitel 1.1) impliziert.

Im Rahmen des folgenden Unterkapitels 6.1 werden der entwickelte Modellansatz und dessen technische Umsetzung näher erläutert. Im Anschluss daran erfolgt sowohl die Festlegung der Basisparameter (siehe Kapitel 6.2) als auch eine kritische Diskussion zur Verifikation und Validierung des Szenariomodells (siehe Kapitel 6.3). Auf die ausführliche Darlegung der programmiertechnischen Hintergründe wird aus Gründen des Umfangs verzichtet. Diese ist zur Erlangung des grundlegenden Verständnisses zum Simulationsablauf nicht erforderlich.

6.1 Modellierungsansatz und Umsetzung

Die Struktur des computergestützten Szenariomodells für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Das Modell bildet das Angebot, die Nachfrage und externe Einflussfaktoren auf dem Fahrzeugmarkt ab, um umfassende Szenarioanalysen zur Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes durchführen zu können. Im Wesentlichen

werden hierfür die im Rahmen der vorangegangenen Kapitel erörterten Informationen und methodischen Ansätze miteinander verknüpft.



Grundsätzlich folgt die Modellierung dem „bottom-up“-Prinzip unter Berücksichtigung sowohl ingenieurwissenschaftlicher als auch wirtschaftswissenschaftlicher Perspektiven. Im Schwerpunkt ist der antriebstechnologische und ökonomische Kontext vertieft abgebildet. Um Realitätsnähe widerzuspiegeln, erfolgt eine agentenbasierte Modellierung mit diskreter Kaufentscheidung. „Das System-Verhalten resultiert dabei aus dem Verhalten der einzelnen Agenten und wird nicht auf Systemebene vorgegeben“ [162]. Weiterhin können heterogene Verhaltensweisen und gegenseitige Abhängigkeiten von anderen Individuen explizit abgebildet werden [162]. Im Ergebnis resultiert die Modellanwendung in einem Szenario, welches die Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes aufzeigt. Durch die Kombination der modellbasierten Simulation mit der Methode der Szenario-Gestaltung ist es möglich, soziotechnische Gestaltungsspielräume zu vertiefen

und Folgenbündel entsprechender Entscheidungsalternativen zu verdeutlichen [163]. Im Gegensatz zu Prognosen wird dabei nicht behauptet, dass die aufgezeigten Entwicklungen mit Sicherheit oder mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten.

6.1.1 Modellierung des Angebots

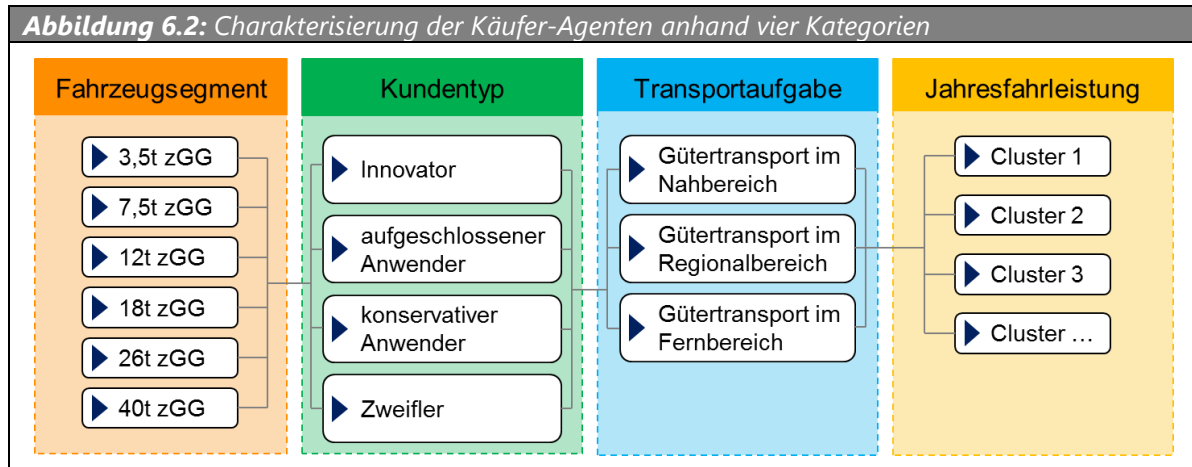
Das Fahrzeug- und Technologieangebot ist über einen Fahrzeugherstellereagenten abgebildet. Dieser bietet Nutzfahrzeugkonzepte mit konkurrierenden Antriebstechnologien hinsichtlich der für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland relevanten sechs Fahrzeugsegmenten auf dem Fahrzeugmarkt an. Eine Differenzierung nach verschiedenen Herstellern und deren Markenprodukte findet nicht statt, da der Fokus der Szenarioergebnisse auf gesamtwirtschaftlichen und gesamtfloottenbezogenen Aussagen liegt. Zudem wird die Marke eines Fahrzeuges als ein weniger wichtiges Kaufkriterium angesehen (siehe hierzu Kapitel 2.2, Abbildung 2.4). Die Höhe des Angebots gleicht der über alle Segmente kumulierten jährlich durchschnittlichen Anzahl an Neuzulassungen. Weiter differenziert angeboten werden sieben konkurrierende Antriebskonzepte (ICE, MHEV, FHEV, PHEV, REEV, BEV und FCEV), welche die verschiedenen Energieträger, Dieselkraftstoff, Erdgas, elektrischer Strom und Wasserstoff ausschließlich oder auch kombiniert nutzen⁴¹. Die Nutzfahrzeugkonzepte sind dem Stand der Technik zum Referenzjahr 2015 entsprechend parametrisiert (siehe Kapitel 3.1). Die Konfiguration des Antriebsstrangs orientiert sich entweder an den am Markt verfügbaren Fahrzeugkonzepten oder an bereits vorgestellten Prototypen. Andernfalls ist diese auf Basis von Expertenschätzung vorgenommen worden. Die Bestimmung der Fahrzeugeigenschaften erfolgt unter Anwendung des im Kapitel 4 erläuterten techno-ökonomischen Bewertungsmodells für Nutzfahrzeugkonzepte. Die Berechnungen der Herstellungskosten des darauffolgenden Betrachtungsjahres, für die Komponenten die der Erfahrungskurve unterliegen, basieren auf der verkauften Gesamtmenge des Vorjahres. Die Herstellungskosten der Elemente der Technologie-

⁴¹ Die betrachteten Antriebskonzepte sind demnach: ICE-D/CNG/LNG, MHEV-D/CNG/LNG, FHEV-D/CNG/LNG, PHEV-D/CNG/LNG, REEV-D/CNG/LNG/FC, BEV (1), BEV (2) und FCEV. BEV (2) weist dabei die doppelte Reichweite von BEV (1) auf.

portfolios und der Fahrzeugkomponenten, die nicht der Erfahrungskurve unterliegen, bleiben unveränderlich über der Zeit und werden fix vorgegeben. Essentiell für den Fahrzeugherstelleragenten sind die Sicherstellung einer adäquaten Gewinnmarge sowie deren Maximierung. Mitunter fordert die Einführung neuartiger Technologien die Akzeptanz von negativen Deckungsbeiträgen über einen begrenzten Zeitraum. Positive Deckungsbeiträge ergeben sich mit zunehmenden Stückzahlen und damit verbundenen Skalen- und Lerneffekten. Um mögliche Marktpotentiale vollumfänglich aufzeigen zu können, ist die Verfügbarkeit der konkurrierenden Antriebskonzepte zu jederzeit vorausgesetzt und nicht seitens des Herstelleragenten eingeschränkt. Eine Einschränkung ist bezüglich einzelner Elemente des Technologieportfolios implementiert. In Abhängigkeit verschiedener Evolutionsstufen ist deren Verfügbarkeit zeitlich definiert (siehe Kapitel 5).

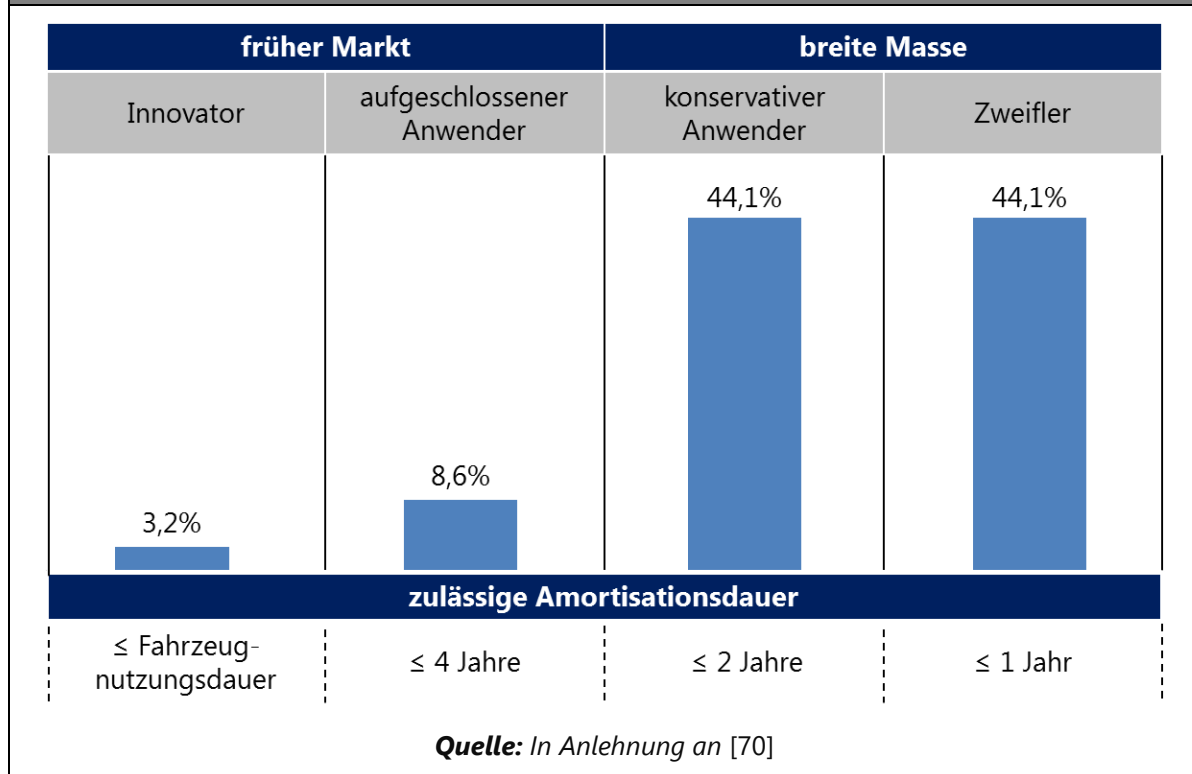
6.1.2 Modellierung der Nachfrage

Die Nachfrage nach dem Fahrzeugangebot ist durch eine Vielzahl an Käufer-Agenten abgebildet. Im Gegensatz zu Güterverkehrsnachfragemodellen wird nicht darüber entschieden, welcher Verkehrsträger genutzt wird. Vielmehr wird auf Basis des vorhandenen Angebots entschieden, welches Antriebskonzept präferiert wird. Käufer-Agenten sind anhand der vier Kategorien Fahrzeugsegment, Kundentyp, Transportaufgabe und Jahresfahrleistung charakterisiert (siehe Abbildung 6.2). Aufgrund der erfolgten Differenzierung ergeben sich insgesamt 628 verschiedene Käufer-Agenten.



Die Differenzierung entsprechend der sechs Fahrzeugsegmente erfolgt auf Basis des Erkenntnisgewinns hinsichtlich der Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen. Dabei ist die Größe des Fahrzeugsegmentes durch den Neuzulassungsanteil bestimmt (siehe Kapitel 2.1, Abbildung 2.1).

Die Amortisationsdauer wird als ein maßgebliches Kriterium bei der Adoptionsentscheidung alternativer oder zusätzlicher Technologieoptionen erachtet. Auf Basis empirischer Daten wurden die Präferenzen von Flottenbetreibern anhand von vier Kategorien aufgezeigt (siehe Kapitel 2.2, Abbildung 2.5). Die Innovationsfreude wird anhand der Akzeptanz hinsichtlich einer zulässigen Amortisationsdauer interpretiert und die vier Kundentypen, Innovator, aufgeschlossener Anwender, konservativer Anwender und Zweifler unterschieden. Im Gegensatz zu Rogers [64] wird damit eine eigene marktspezifische Charakteristik unterstellt, die nicht einer idealtypischen Normalverteilung gleicht. Der frühe Markt wird durch 11,8 % der Käufer-Agenten repräsentiert und ist durch eine höhere Risikobereitschaft im Vergleich zur breiten Masse (88,2 % der Käufer-Agenten) gekennzeichnet (siehe Abbildung 6.3).

Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der Kundentypen, ihrer Anteile und ihrer zulässigen Amortisationsdauer

Wie im Rahmen von Kapitel 4.1 beschrieben werden drei wesentliche Transportaufgaben, Gütertransport im Nahbereich, Gütertransport im Regionalbereich und Gütertransport im Fernbereich berücksichtigt. Ein charakteristisches Merkmal dieser Transportaufgaben ist der Entfernungsbereich. Auf Basis der Analyse empirischer Daten, bezüglich des Einsatzes von Fahrzeugen der verschiedenen Klassen (N_1 , N_2 und N_3) bzw. der definierten Fahrzeugsegmente (siehe Kapitel 2.1) innerhalb der differenzierten Entfernungsbereiche, erfolgt eine Zuweisung zu den verschiedenen Transportaufgaben (siehe Kapitel 4.1).

Im Wesentlichen wird der Verkehr deutscher Nutzkraftwagen im Rahmen von drei unabhängig voneinander durchgeführten empirischen Erhebungen, namentlich „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland“ (KID), „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge“ (VD) und „Verkehr in Kilometer der deutschen Kraftfahrzeuge“ (VK) erfasst. Die KID umfasst Informationen zum Einsatzzweck sowie zu den räumlichen und zeitlichen Ein-

satzmustern des Kraftfahrzeugverkehrs (Pkw und Lkw) gewerblicher sowie privater Fahrzeughalter. Ein Schwerpunkt der Stichtagsbefragung liegt bei Fahrzeughaltern von Nutzkraftwagen bis einschließlich 3,5 Tonnen Nutzlast. Dies entspricht einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 7,5 Tonnen. Im Rahmen von acht Erhebungswellen⁴² wurden Befragungen an allen Wochentagen Montag bis Sonntag durchgeführt. Anhand dieser Verteilung der Erhebungswochen über das Jahr sowie auf die einzelnen Wochentage wurde erreicht, dass auch saisonale, schulferienbedingte und wochentagsbedingte Einflüsse auf den Einsatz und die Nutzung von Kraftfahrzeugen erfasst werden konnten. Berücksichtigt werden in Deutschland zugelassene Kraftfahrzeuge (Inländerkonzept). Die für die Erhebung vorgesehenen Kraftfahrzeuge werden aus dem Zentralen Fahrzeugregister (ZFZR) ausgewählt [164]. Die amtliche Verkehrsstatistik VD des Kraftfahrt-Bundesamtes basiert auf einer geschichteten Stichprobenziehung auf Basis der im ZFZR des KBA eingetragenen Fahrzeuge und umfasst ebenso Informationen zum Einsatzzweck sowie zu den räumlichen Einsatzmustern des Kraftfahrzeugverkehrs. Der Sammelbegriff „*Lastkraftfahrzeuge*“ steht hierbei für einfache Güterkraftfahrzeuge (Lastkraftwagen, Sattelzugmaschinen) und kombinierte Güterkraftfahrzeuge (Lastzug, Sattelzug) [56]. Berücksichtigt werden in Deutschland zugelassenen Kraftfahrzeuge (Inländerkonzept). Als Berichtszeitraum sind Halbwochen festgeschrieben (1. Halbwoche: Sonntag 22:00 Uhr bis Mittwoch 24:00 Uhr; 2. Halbwoche: Donnerstag 0:00 Uhr bis Sonntag 22:00 Uhr) [165]. Der Betrachtungsumfang der amtlichen Verkehrsstatistik beschränkt sich jedoch auf Nutzkraftwagen mit einer Nutzlast größer als 3,5 Tonnen. Dies entspricht zum Großteil Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 7,5 Tonnen. Grundlage der VK sind Daten aus Prüfvorgängen und Mängelfeststellungen, die im Rahmen der Durchführung von Hauptuntersuchungen von Kraftfahrzeugen und Anhängern erhoben werden [166]. Die amtliche Verkehrsstatistik VK des Kraftfahrt-Bundesamtes umfasst mittlere Jahresfahrleistungsangaben differenziert nach der Fahrzeugart. Die soeben genannten Da-

⁴² Eine Erhebungswoche bestand dabei aus einer Befragungswoche (Hauptlauf) und einer zeitlich versetzten Woche mit Befragung der Halter, die auf den Hauptlauf nicht geantwortet hatten.

tensätze werden als repräsentativ für den Güterkraftverkehr in Deutschland angesehen und zur Analyse fahrzeugrelevanter Merkmale herangezogen. Vor dem Hintergrund verschiedener Betrachtungsumfänge dienen die Daten der KID als Grundlage für das Fahrzeugsegment 3,5 t zGG (LNF), wohingegen die Daten der VD als Grundlage bezüglich der fünf verbleibenden Segmente (SNF) genutzt werden. Die Daten der VK können sowohl für das Segment der leichten als auch für die Segmente der schweren Nutzfahrzeuge herangezogen werden.

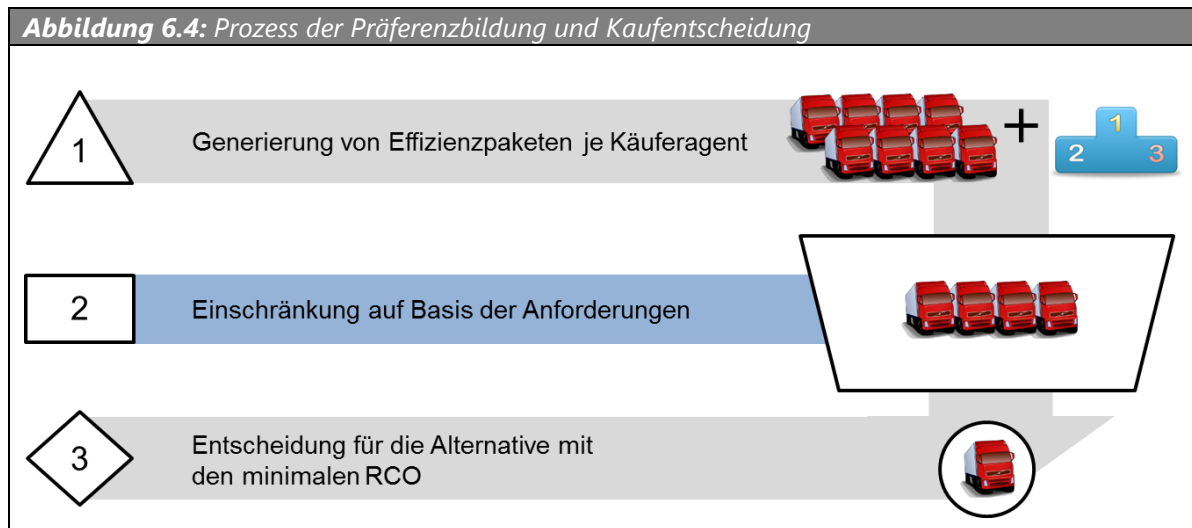
Der KID-Datensatz erlaubt die Analyse der Fahrtweiten von Einzelfahrten gewerblicher Halter im Güterverkehr in Deutschland für Fahrzeuge des Segments 3,5 t zGG und ermöglicht damit die Zuweisung zu den differenzierten Transportaufgaben. Für die verbleibenden Segmente existiert keine standardmäßige Auswertung hinsichtlich des Anteils von Fahrzeugen verschiedener Größenklassen bzw. Segmente mit Einsatz innerhalb einer Entfernungsstufe. Dies gilt ebenso hinsichtlich der Anzahl an Fahrten von Fahrzeugen verschiedener Größenklassen bzw. Segmente innerhalb einer Entfernungsstufe. Vor diesem Hintergrund wurde eine Sonderauswertung des VK-Datensatzes beim Kraftfahrtbundesamt beauftragt. Der resultierende Datensatz umfasst unter anderem die Anzahl der Fahrten (Leerfahrten und Fahrten mit Ladung) im gewerblichen Verkehr zum Jahr 2014 mit der Zahl der zugrundeliegenden Stichprobenfahrzeuge, je Entfernung in km mit der Schrittweite 1 (bis 1.000 km gesondert, über 1.000 km zusammengefasst). Zudem erfolgte eine Gliederung der Lastkraftwagen entsprechend des zulässigen Gesamtgewichts in fünf verschiedene Kategorien: bis 7.500 kg, 7.501 bis 12.000 kg, 12.001 bis 18.000 kg, 18.001 bis 26.000 kg, über 26.000 kg. Die Gliederung der Sattelzugmaschinen erfolgte in vier Kategorien: bis 16.000 kg, 16.001 bis 18.000 kg, 18.001 bis 20.000 kg, über 20.000 kg. Ausgewiesen sind jeweils hochgerechnete Absolutwerte für die Fahrten, die Zahl der zugrunde liegenden Stichprobenfahrzeuge und die Prozentanteile der Gewichtgruppen innerhalb der einzelnen Entfernungen. Auf Basis dieses Datensatzes, der im Folgenden als KBA-

Sonderauswertung bezeichnet wird, kann die Zuweisung der Fahrzeugsegmente zu den differenzierten Transportaufgaben erfolgen.

Neben dem Fahrprofil, welches durch eine für die Transportaufgabe charakteristische Gewichtung der zugrunde liegenden Fahrzyklen (städtischer Zyklus, regionaler Zyklus und Autobahnzyklus) definiert ist, ist die Jahresfahrleistung ein weiteres Merkmal einer Transportaufgabe. Hierzu wurden Häufigkeitsverteilungen der Jahres- und Tagesfahrleistung je Fahrzeugsegment und Transportaufgabe auf Basis empirischer Daten der zuvor genannten Datensätze KID und VD bestimmt. Für das Fahrzeugsegment 3,5 t zGG erfolgte eine Auswertung des KID-Datensatzes bezüglich der Tagesfahrleistung unter Berücksichtigung der Fahrtweite. Die resultierenden Häufigkeitsverteilungen bezüglich der Tagesfahrleistung wurden mit guter Näherung mittels Betaverteilungen beschrieben. Hinsichtlich der verbleibenden Fahrzeugsegmente erfolgte die Ableitung von Häufigkeitsverteilungen bezüglich der Tagesfahrleistung auf Basis der KBA-Sonderauswertung mittels Monte-Carlo-Simulation⁴³. Kalibriert sind die resultierenden Jahresfahrleistungsverteilungen auf die mittleren Jahresfahrleistungen der verschiedenen Fahrzeugarten entsprechend der Erhebung „*Verkehr in Kilometer der deutschen Kraftfahrzeuge*“. Der Streckenanteil der Jahresfahrleistung der rein elektrisch gefahren wird, ist bestimmt durch das Verhältnis der rein elektrischen Reichweite zur Tagesreichweite und somit agentenspezifisch. Bezüglich jeder erzeugten Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung erfolgte eine Bildung von Jahresfahrleistungsclustern, um einerseits den Einfluss der Fahrzeuge mit ähnlicher Jahresfahrleistung möglichst zu verdeutlichen und andererseits den Rechenaufwand der Modellsimulation zu verringern. Dabei ist zu beachten, dass die den einzelnen Käufer-Agenten angebotene Anzahl an Fahrzeugkonzepten in plausiblen und wirksamen Verhältnissen zueinanderstehen.

⁴³ Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik, um analytisch nicht oder nur aufwendig lösbare Probleme mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie numerisch zu lösen. Die Grundlage stellt das „Gesetz der großen Zahl“ dar, welches besagt dass die relative Häufigkeit eines Zufallsexperiments sich um die theoretische Wahrscheinlichkeit eines Zufallsergebnisses stabilisiert (Grundlage: Experiment wird immer unter denselben Voraussetzungen durchgeführt).

Der Prozess der Präferenzbildung und Kaufentscheidung folgt drei prioritären Schritten (siehe Abbildung 6.4). Grundsätzlich wird ein unbeschränktes Wissen der Käufer-Agenten über alle Nutzfahrzeugkonzeptalternativen vorausgesetzt.



Jedes der angebotenen Nutzfahrzeugkonzepte besitzt ein Technologieportfolio mit Technologieelementen zur Reduktion des Streckenverbrauchs (siehe Kapitel 5). Jeder Käufer-Agent nimmt unter Berücksichtigung der Evolutionsstufe und der Amortisationsdauer eine Einschränkung der vorhandenen Technologieelemente vor. Die Auswahl einzelner Technologieelemente erfolgt solange die agentenspezifische Amortisationsdauer B nicht überschritten wird. Die Amortisationsrechnung dient der Risikoabschätzung und ermöglicht die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Technologieinvestitionen [167]. Dabei wird der Zeitraum in Jahren ermittelt nach dem sich das eingesetzte Kapital K durch vorhandene jährliche Kapitalrückflüsse R^a voraussichtlich amortisiert (siehe Gleichung (38)).

$$B = \frac{K}{R^a} \quad (38)$$

Der erforderliche Kapitaleinsatz eines Effizienzpakets⁴⁴ ergibt sich aus der Summe der erforderlichen Kapitaleinsätze der berücksichtigten Technologieelemente. Die Kapital-

⁴⁴ Ein Effizienzpaket besteht aus der Summe der ausgewählten Technologieelemente.

rückflüsse sind dabei abhängig vom Preis des verwendeten Energieträgers, der Jahresfahrleistung und dem Potential zur Reduktion des Streckenverbrauchs. Entsprechend der Gewichtung der Fahrzyklen ergibt sich ein transportaufgabenspezifischer Nutzwert für jedes Technologieelement. Die Ermittlung des Reduktionspotentials eines Effizienzpaketes RP^{EP} erfolgt dabei nach Gleichung (39).

$$RP^{EP} = 100 \cdot \left[1 - \prod_{n=1}^m \left(1 - \frac{RP_n^{TE}}{100} \right) \right] \quad (39)$$

Im Anschluss an die Generierung der Effizienzpakete erfolgt die Präferenzbildung und Einschränkung der angebotenen Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis verschiedener Anforderungen der Käufer-Agenten. Dabei werden fahrzeugsegmentspezifische Anforderungen an die Nutzlast und an das Nutzvolumen, sowie antriebskonzeptspezifische Anforderungen an die Tagesreichweite und individuelle Amortisationsdaueranforderungen der Käufer-Agenten betrachtet. Diese Anforderungen werden mit den fahrzeugkonzeptindividuellen Eigenschaften abgeglichen. Auf Basis der vorkonfigurierten Nutzfahrzeugkonzeptalternativen werden die zur Verfügung stehende Nutzlast, das verfügbare Nutzvolumen und die Reichweite bestimmt. Die Ermittlung der Amortisationsdauer erfolgt entsprechend Gleichung (38). Das eingesetzte Kapital entspricht dabei der Differenz der Investitionskosten jeder Nutzfahrzeugkonzeptalternative im Vergleich zum Referenzfahrzeug. Als Referenzfahrzeug ist das konventionelle dieselmotorisch betriebene Antriebstrangkonzzept festgelegt. Der Kapitalrückfluss entspricht der Differenz der laufenden Kosten pro Jahr.

Im Gegensatz zum privaten Adoptionsverhalten, werden im Rahmen des organisationalen Adoptionsverhaltens Entscheidungen mit einer höheren Rationalität und einer geringeren Spontaneität getroffen (siehe Kapitel 2.2). Demnach erfolgt letztlich die Kaufentscheidung auf Basis der minimalen RCO (siehe Kapitel 4.4). Dabei werden nur die Fahrzeugalternativen berücksichtigt, die allen Anforderungen entsprechen. Die Kaufentscheidung wird für jede Kombination aus Käufer-Agent, Fahrzeugsegment und Transportaufgabe separat modelliert.

6.1.3 Betrachtung externer Einflussfaktoren

Neben den Fahrzeugeigenschaften des Angebots und der Präferenzen der Nachfrager beeinflussen zudem externe Faktoren die Kaufentscheidung.

Eine mangelnde Lade- bzw. Betankungsinfrastrukturdichte stellt ein wesentliches Hindernis hinsichtlich der Akzeptanz alternativer Antriebskonzepte dar [168]. Wie im Rahmen von Kapitel 4.4.2 erläutert, wird unterstellt, dass neben dem technologischen Reifegrad einer Technologie die Infrastrukturdichte den Wiederverkaufswert alternativer Antriebskonzepte wesentlich beeinflusst. Je geringer die Infrastrukturdichte, desto geringer ist der zu erzielende Wiederverkaufswert. Somit erfolgt eine Monetarisierung der extern vorgegebenen Infrastrukturdichte. Hierdurch wird vermieden, diese als Ausschlusskriterium im Rahmen des Präferenzbildungs- und Entscheidungsprozesses zu implementieren und unterstützt die Identifikation der Marktpotentiale alternativer Antriebskonzepte. Die Infrastrukturdichte wird als prozentualer Abdeckungsgrad vorgegeben, unter Berücksichtigung der derzeitigen Situation zusammengefasst in [46]. Auch kann ein zukünftiger Ausbau entsprechend des nationalen Strategierahmens über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU berücksichtigt werden [169]. Es wird angenommen, dass zukünftige Entwicklungen im Bereich der Elektrik & Elektronik bei Fahrzeugen der Klassen N_1 , N_2 und N_3 durch technologische Entwicklungsfortschritte bei Personenkraftwagen und Bussen geprägt sein werden. Dies gilt insbesondere für die elektrische Maschine, die Leistungselektronik, das Brennstoffzellensystem und das Batteriesystem. Demzufolge ist davon auszugehen, dass Übertragungseffekte sowohl zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit als auch zur Kostenreduktion der Systeme über alle Fahrzeugsegmente hinweg genutzt werden können, sofern eine Skalierbarkeit auf Systemebene, die wiederum eine Modularisierung auf Komponentenebene voraussetzt, gegeben ist. Eine Modularisierung auf Komponentenebene ist derzeit vor allem bei Brennstoffzellen- und Batteriesystemen zu beobachten. Die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Übertragungseffekten erfolgt im Modell auf Basis der Erfahrungs-

kurventheorie (siehe Kapitel 4.4). Die Kopplung der auf verschiedenen Märkten erzielten Stückzahlen pro Jahr und eine Anpassung der Lernrate resultieren in einer beschleunigten Kostenentwicklung der betrachteten Komponente. Eine Betrachtung von Übertragungseffekten ist somit auf die Komponenten beschränkt, die einer Erfahrungskurve unterliegen (siehe Kapitel 4.4, Tabelle 4.3).

Über das Technologieportfolio, erläutert in Kapitel 5, sind technologische Entwicklungen wie z.B. die Effizienzsteigerung oder die Steigerung der gravimetrischen Energiedichte von Technologieelementen berücksichtigt. Jeder Käufer-Agent entscheidet individuell unter gegebenen Rahmenbedingungen über deren Applikation im Nutzfahrzeugkonzept (siehe Kapitel 6.1.2).

Die Entwicklung der Energiepreise beeinflusst in hohem Maße die laufenden Kosten von Nutzfahrzeugkonzepten und damit die Marktpotentiale konkurrierender Antriebskonzepte. Die zukünftige Preisentwicklung von Dieselkraftstoff, Erdgas (CNG und LNG), Strom und Wasserstoff sowie die Entwicklung der mit der Herstellung und Distribution verbundenen CO₂-Emission werden extern auf Basis anerkannter Studien vorgegeben (siehe hierzu Kapitel 7).

Gesetzliche Bestimmungen beeinflussen sowohl das Angebot als auch die Nachfrage. Maßnahmen die im Modell Berücksichtigung finden, sind eine Kaufprämie und eine Steuerbefreiung, differenziert nach Fahrzeugsegment und Antriebsstrangkonzept. Auch wird der extern vorgegebene Energiepreis separiert nach den Nettoenergiekosten und der Energiesteuer betrachtet, um mögliche Effekte divergierender Energiesteuerpolitik aufzeigen zu können. Entsprechend der europäischen Gesetzeslage sind die Hersteller angehalten, einen vom Gesetzgeber vorgegebenen CO₂-Zielwert der Neuwagenflotte einzuhalten. Bei Nichteinhaltung dieses Flottenzielwertes sind Abgaben in Abhängigkeit der Emissionsüberschreitung zu entrichten [170]. Dieses Verfahren ist ebenso implementiert. Vielmehr erfolgt hierüber eine Orientierung der Simulationsergebnisse an vorgegebene CO₂-Flottenzielwerte (siehe Kapitel 6.1.4). Entspre-

chend der Gesetzeslage ist für leichte Nutzfahrzeuge ein CO₂-Flottenzielwert ab dem Jahr 2017 einzuhalten und wird zum Jahre 2020 weiter verschärft [170]. Für schwere Nutzfahrzeuge ist ein CO₂-Flottenzielwert inexistent. Eine CO₂-Regulierung wird jedoch zum Jahre 2019 erwartet [171].

6.1.4 Orientierung an CO₂-Flottenzielwerten

Aufgrund verschiedener Transportaufgaben (siehe Kapitel 4.1) und einer hohen Variantenvielfalt an verbrauchsrelevanten Nutzfahrzeugkonzepten werden CO₂-Flottenzielwerte segmentspezifisch vorgegeben. Ziel ist es, mögliche Antriebsportfolios zu ermitteln, die den vorgegebenen CO₂-Flottenzielwerten möglichst gerecht werden. Hierfür wird der arithmetische Mittelwert der TtW-CO₂-Emissionen der Neuzulassungen je betrachtetem Fahrzeugsegment und die Differenz zum segmentspezifischen Zielwert errechnet. Bei Überschreitung des Zielwertes wird fahrzeugkonzeptindividuell eine Abgabe in Abhängigkeit der Abweichung berücksichtigt, die direkt an den Nachfrager weitergegeben wird und somit direkt die Kaufentscheidung beeinflusst. Hiermit wird implizit auch unterstellt, dass sich die vom Gesetzgeber vorgegebenen TtW-CO₂-Zielwerte auf die Preispolitik des Fahrzeugherstelleragenten auswirken und dieser nicht gewillt ist, mögliche Abgaben selbst zu tragen. Der Startwert der Abgabe wird segmentspezifisch vorgegeben und orientiert sich an der Gesetzeslage [170]. Mittels eines binären Suchalgorithmus wird die Höhe der Abgabe solange angepasst, bis die Differenz des arithmetischen Mittelwerts der TtW-CO₂-Emissionen der Neuzulassungen eines jeden Fahrzeugsegmentes zum vorgegebenen Zielwert innerhalb eines gegebenen Toleranzbereichs liegen. Der Neuzulassungsanteil je Antriebsstrangkonzzept wird auf Basis der Summe aller agentspezifischen Entscheidungsprozesse generiert, unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Angebotsportfolios und der agentspezifischen Nachfragemenge. Die Summe aller Absatzzahlen der in einem Betrachtungsjahr zur Verfügung stehenden Nutzfahrzeugkonzepte über alle Fahrzeugsegmente ergibt die Gesamtanzahl der Neuzulassungen.

Die resultierenden „Well-to-Wheel“ (WtW) und TtW-CO₂-Emissionen sowie der Energiebedarf werden dabei segmentspezifisch ermittelt.

6.2 Festlegung der Basisparameter

In Vorbereitung zur Modellanwendung sind wesentliche Parameter festzulegen, die als Eingangsgrößen zur Berechnung verwendet werden.

Wie in Kapitel 2 erläutert, umfasst der Betrachtungsrahmen den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland. Hierfür wurden sechs relevante Fahrzeugsegmente identifiziert. Die Entwicklung der Gesamtanzahl an Neuzulassungen sowie der Marktanteile einzelner Fahrzeugsegmente wird fix vorgegeben. Diese entsprechen den Mittelwerten des Betrachtungszeitraums von 2005 bis 2014. Somit wird die Konkurrenzsituation einzelner Fahrzeugsegmente über der Zeit nicht berücksichtigt. Um verschiedenen Transportaufgaben gerecht zu werden, erfolgt auf Basis empirischer Daten, wie im Rahmen von Kapitel 6.1.2 beschrieben, eine weitere Gliederung der Nutzfahrzeuge innerhalb eines Segments hinsichtlich der Einsatzbereiche, Nah-, Regional- und Fernbereich. Tabelle 6.1 beinhaltet die Basisparameter der soeben beschriebenen Gliederung des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes.

Tabelle 6.1: Basisparameter des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes					
Gesamtanzahl an Neuzulassungen	Fahrzeugsegment	Marktanteil	Einsatz im Nahbereich	Einsatz im Regionalbereich	Einsatz im Fernbereich
100 % \triangleq ca. 272.000 Fzg.	3,5t zGG	75 %	60 %	26 %	14 %
	7,5t zGG	7 %	99 %	1 %	-
	12t zGG	3 %	42 %	40 %	18 %
	18t zGG	2 %	70 %	24 %	6 %
	26t zGG	4 %	70 %	25 %	5 %
	40t zGG	9 %	32 %	35 %	33 %
Quellen: Modellannahme auf Basis KBA-Sonderauswertung und KID-Datensatz					

Charakteristischer Anwendungsspezifika hinsichtlich des Einsatzbereiches und der Transportaufgabe wird mittels einer unterschiedlichen Gewichtung der Streckenanteile

le und damit der zugrunde gelegten Fahrzyklen Rechnung getragen (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Transportaufgabenspezifische Streckenanteile			
Transportaufgabe	urban	regional	Autobahn
Gütertransport im Nahbereich	80 %	20 %	0 %
Gütertransport im Regionalbereich	20 %	70 %	10 %
Gütertransport im Fernbereich	0 %	20 %	80 %
Quelle: Modellannahme			

Eine Anforderung an neue Antriebskonzepte ist, den Einfluss auf das Nutzvolumen und die Nutzlast möglichst gering zu halten. Um mögliche Freiheitsgrade einzuschätzen, wurden Analysen hinsichtlich des genutzten Rauminhalts und der gravimetrischen Auslastung auf Basis empirischer Daten durchgeführt (siehe Tabelle 6.3). Bei durchschnittlich 57 % der tatsächlich transportierten Beförderungsleistung im gewerblichen Verkehr betrug der genutzte Rauminhalt mehr als 90 %. Die gravimetrische Auslastung betrug im selben Betrachtungszeitraum (2006 bis 2014) im Mittel ca. 57 % und differiert nur geringfügig zwischen den Entfernungsbereichen. Im Gegensatz dazu streut die mittlere gravimetrische Auslastung für verschiedene Fahrzeugsegmente deutlich, zwischen 34 % und 67 %.

Tabelle 6.3: Gravimetrische und volumetrische Auslastung		
Fahrzeugsegment	gravimetrische Auslastung	volumetrische Auslastung
3,5t zGG	34 %	90 %
7,5t zGG	52 %	
12t zGG	55 %	
18t zGG	50 %	
26t zGG	60 %	
40t zGG	67 %	
Quellen: Modellannahme auf Basis [56] und KID-Datensatz		

Die segmentspezifischen Fahrzeugparameter entsprechen den im Rahmen der Kapitel 3.2, Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 festgelegten Werten. Eine Zusammenfassung dieser Werte beinhaltet die Tabelle 6.4 und die Tabelle 6.5. Das nutzbare Ladevolumen basiert dabei auf Analysen verfügbarer Fahrzeugmodelle benannt in [155].

Tabelle 6.4: Segmentspezifische Fahrzeugparameter			
Fahrzeugsegment	Querschnittsfläche A in m^2	Luftwiderstandsbeiwert c_W	Rollwiderstandsbeiwert f_R in ‰
3,5t zGG	3,5	0,37	8,50
7,5t zGG	7,0	0,45	7,35
12t zGG	8,0	0,50	7,35
18t zGG	9,0	0,55	6,00
26t zGG	9,0	0,55	6,00
40t zGG	10,0	0,53	6,00

Tabelle 6.5: Basismassen und nutzbare Ladevolumina		
Fahrzeugsegment	Basismasse in kg	nutzbares Ladevolumen in m^3
3,5t zGG	1.446	13
7,5t zGG	3.555	20
12t zGG	5.104	40
18t zGG	9.220	50
26t zGG	9.613	50
40t zGG	12.138	90
Quellen: eigene Ermittlung und [155]		

Hinsichtlich der komponentenspezifischen Parameter, wie der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte sowie den Angaben zum Wirkungsgrad, wird auf die Erkenntnisse im Rahmen des Kapitels 3.1 verwiesen. Die spezifischen Kosten der betrachteten Komponenten beinhaltet Tabelle 4.3 (siehe Kapitel 4.4). Die Erfahrungskurvenparameter sind der Tabelle 4.4 und die Herstellkosten der Basisfahrzeuge sowie die Investitionskosten des Sattelauflegers sind der Tabelle 4.2 (siehe Kapitel 4.4) zu entnehmen.

Die Antriebstrangkonfiguration entspricht dem Median am Markt verfügbarer und herstellerübergreifender Modelle (siehe hierzu Anhang B, Tabellen B.9 bis B.14). Hinsichtlich der alternativen Antriebskonzepte wurde sich, sofern vorhanden, an der Fahrzeugkonfiguration bereits verfügbarer Modelle oder an vorgestellten Prototypen orientiert. Die Kapazität der Traktionsbatterie für vollelektrische Fahrzeuge (BEV) ist so gewählt, dass diese in der ersten Variante unter Berücksichtigung aller zugrunde gelegten Zyklen eine Reichweite von mindestens 150 km erreicht. In der zweiten Variante erreicht das vollelektrische Fahrzeugkonzept eine Reichweite von mindestens 300 km. Fahrzeuge mit einem Aggregat zur Reichweitenverlängerung (REEV) entsprechen in der Konfiguration dem vollelektrischen Fahrzeugkonzept (erste Variante). Zusätzlich wurde im Vergleich zum jeweiligen Referenzantriebskonzept eine verringerte Tankkapazität und eine verringerte Leistung des Aggregats zur Reichweitenverlängerung antizipiert. Grundsätzlich wird von einem Bestpunktbetrieb des Aggregats zur Reichweitenverlängerung ausgegangen. PHEV-Fahrzeugkonzepte erreichen in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments und des zugrunde gelegten Zyklus elektrische Reichweiten von 11 km bis 35 km. Brennstoffzellenfahrzeuge sind als MHEV ausgelegt, um die elektrische Leistung des Brennstoffzellensystems zu reduzieren und um Rekuperationspotentiale nutzen zu können. Die jeweils zugrunde gelegte elektrische Leistung des Brennstoffzellensystems beträgt 75 % der Antriebsleistung des Referenzfahrzeugs (siehe Anhang H, Tabellen H.1 bis H.6).

Die fahrzeugkonzeptspezifischen Streckenverbräuche basieren auf der im Rahmen von Kapitel 4.3 erläuterten Vorgehensweise. Um dem Einfluss des Beladungszustandes auf den Streckenverbrauch Rechnung zu tragen, erfolgte dessen Bestimmung hinsichtlich drei verschiedener Beladungszustände: Fahrzeugleermasse (Zustand 1), 50 % gravimetrische Auslastung (Zustand 2) und maximal zulässiges Gesamtgewicht (Zustand 3). Unter Berücksichtigung verschiedener Fahrzyklen, der gravimetrischen Auslastung aus Tabelle 6.3, der Fahrzeugkonfiguration und der resultierenden Simulationsmasse ergeben sich die innerhalb Abbildung 6.5, Abbildung 6.6, Abbildung 6.7,

Abbildung 6.8, Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 veranschaulichten Streckenverbräuche je Fahrzeugsegment und Antriebsstrangkonzzept.

Abbildung 6.5: Antriebsstrangkonzeptspezifische Streckenverbräuche – Segment 3,5 t zGG

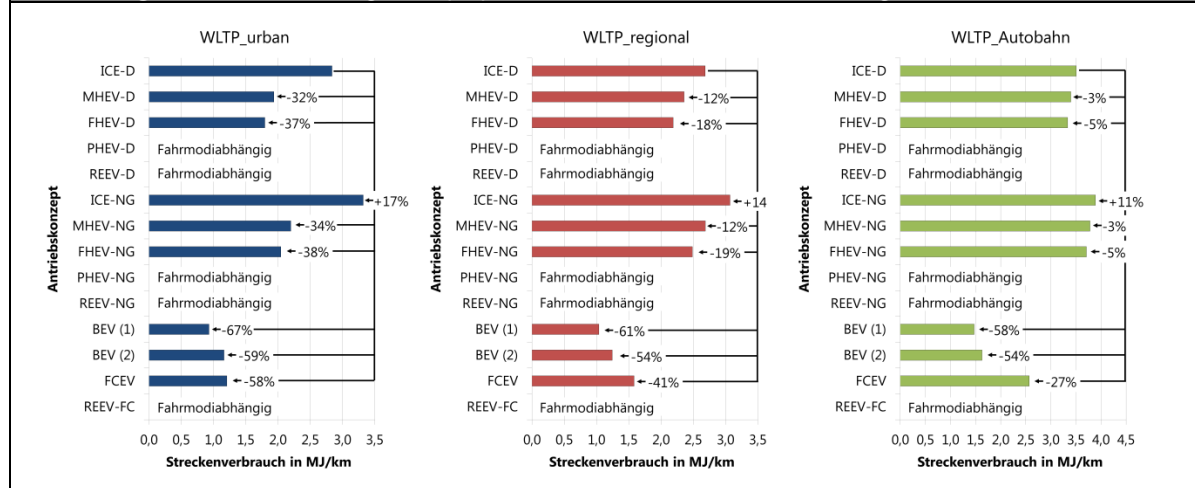


Abbildung 6.6: Antriebsstrangkonzeptspezifische Streckenverbräuche – Segment 7,5 t zGG

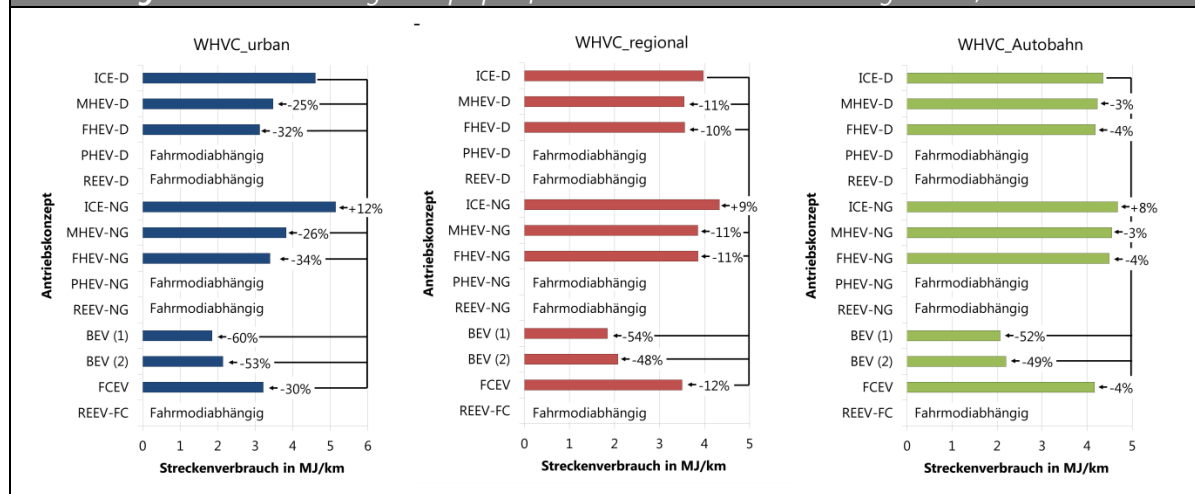


Abbildung 6.7: Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 12 t zGG

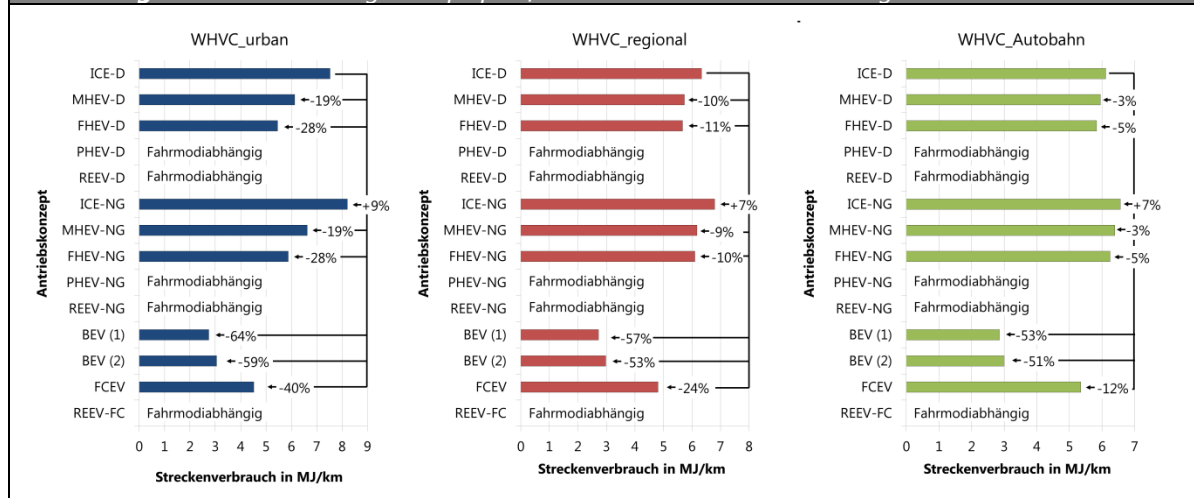


Abbildung 6.8: Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 18 t zGG

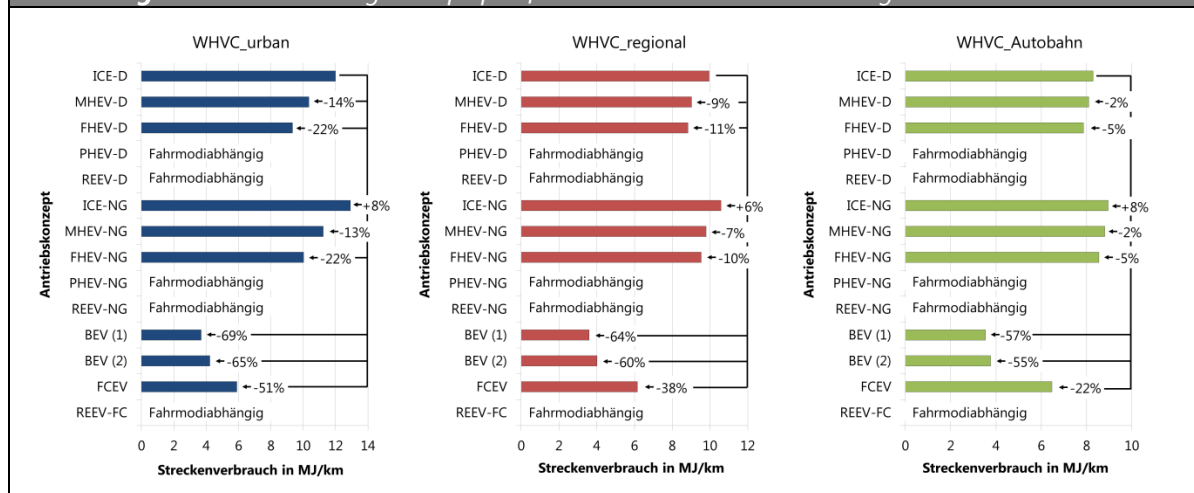


Abbildung 6.9: Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 26 t zGG

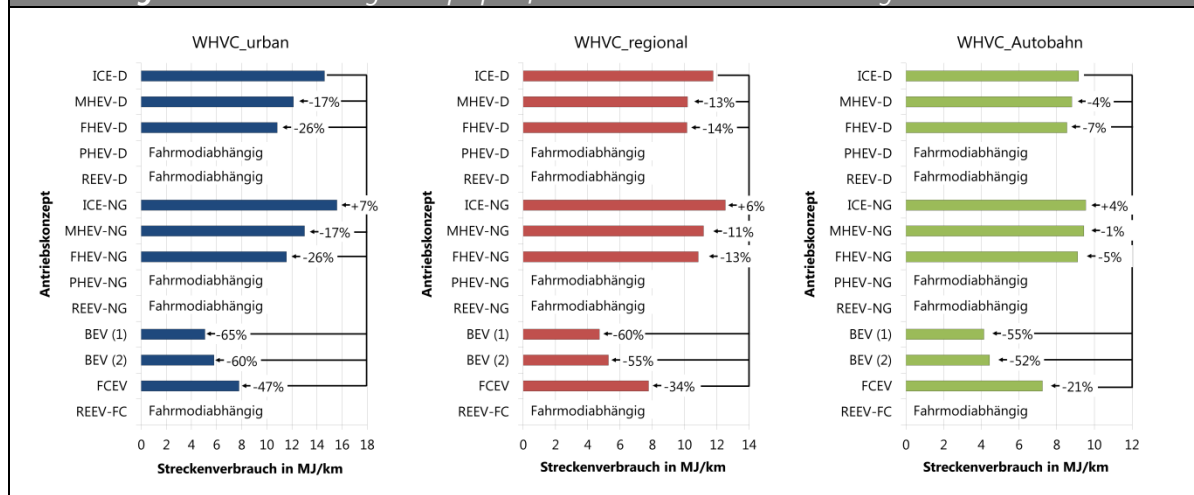
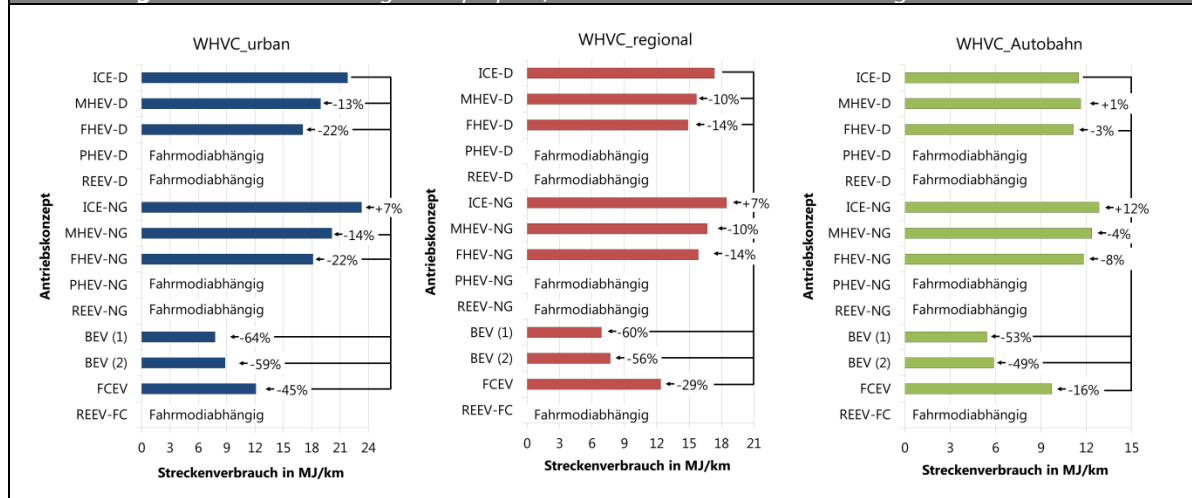


Abbildung 6.10: Antriebsstrangkonzepstspezifische Streckenverbräuche – Segment 40 t zGG

Die in der Literatur angegebenen RPE-Werte variieren zwischen 1,19 und 1,77 [25], [33], [123]. Technologieunabhängig wird der Median in Höhe von 1,45 als Referenzfaktor verwendet.

Vereinfachend wird fahrzeugsegmentübergreifend ein mittlerer AdBlue® Verbrauch in Höhe von 5 %, bezogen auf den ermittelten spezifischen Dieserverbrauch unterstellt [63]. Der verwendete AdBlue®-Tankstellenpreis beträgt 0,51 EUR₂₀₁₀/Liter [172]. Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer bzw. Haltedauer für Lastkraftwagen zur Güterbeförderung im Wirtschaftsverkehr ist der Afa-Tabelle für den Wirtschaftszweig „Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)“ entnommen [173]. Für Lastkraftwagen unter 7,5t zGG beträgt diese sechs Jahre und für Lastkraftwagen ab 7,5t zGG beträgt diese fünf Jahre.

Entsprechend den Angaben des Bundeszentralamtes für Steuern beträgt der Besteuerungssatz für Unternehmen ca. 30 % [174].

Die Höhe des mittleren Zinssatzes beträgt 4,2 % und basiert auf den Abzinsungszinssätzen (10-Jahresdurchschnitt) der Deutschen Bundesbank, bezogen auf das Jahr 2015 [175].

Hinsichtlich der Gliederung nach Kundentypen, der jeweiligen Häufigkeit und ihrer zulässigen Amortisationsdauer wird auf Abbildung 6.3 (siehe Kapitel 6.1.2) verwiesen.

Die linguistischen Terme der Fuzzy-Variablen Infrastrukturdichte und Reifegrad der Technologie je Antriebskonzept beinhaltet Tabelle 6.6.

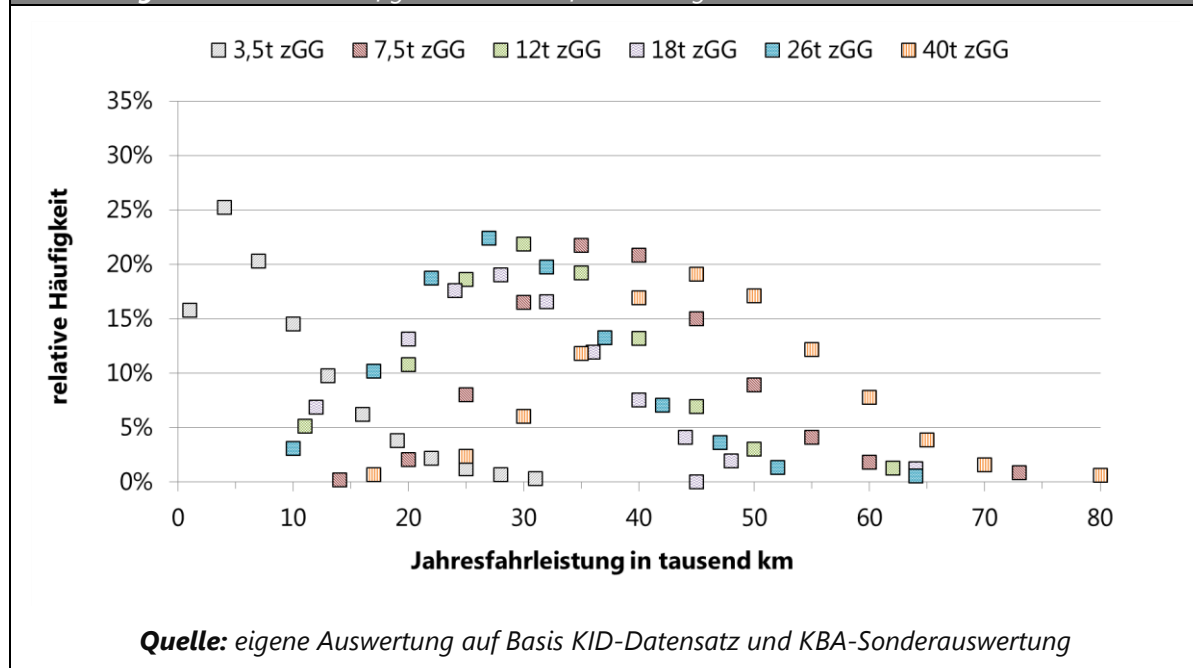
Tabelle 6.6: Linguistische Terme der Fuzzy-Variablen Infrastrukturdichte und Reifegrad der Technologie je Antriebskonzept

		Fuzzy-Variable	
		Infrastrukturdichte	Reifegrad der Technologie
Antriebskonzept	ICE-D	sehr hoch	Basistechnologie
	ICE-CNG	gering	Schlüsseltechnologie
	ICE-LNG	sehr gering	Schlüsseltechnologie
	MHEV-D	hoch	Schlüsseltechnologie
	MHEV-CNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	MHEV-LNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	FHEV-D	hoch	Schlüsseltechnologie
	FHEV-CNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	FHEV-LNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	PHEV-D	mittel	Schlüsseltechnologie
	PHEV-CNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	PHEV-LNG	sehr gering	Schrittmachertechnologie
	REEV-D	mittel	Schrittmachertechnologie
	REEV-CNG	mittel	Schrittmachertechnologie
	REEV-LNG	mittel	Schrittmachertechnologie
	REEV-FC	mittel	Schrittmachertechnologie
	BEV	mittel	Schlüsseltechnologie
	FCEV	sehr gering	Schrittmachertechnologie

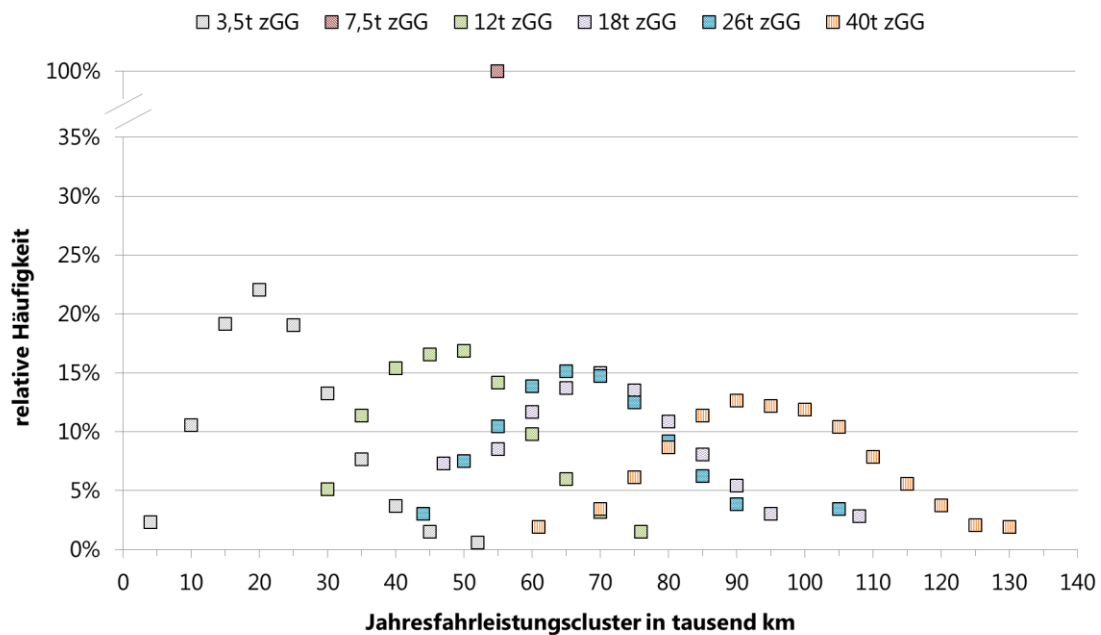
Wie im Rahmen von Kapitel 6.1.2 erläutert, erfolgte eine fahrzeugsegmentspezifische Kalibrierung auf die mittleren Jahresfahrleistungen entsprechend der Erhebung des Kraftfahrtbundesamtes „Verkehr in Kilometer der deutschen Kraftfahrzeuge“. Mittlere Jahresfahrleistungsangaben, entsprechend der gewählten Klassifizierung der Fahrzeugsegmente, existieren nicht, weshalb für die Fahrzeugsegmente 7,5t zGG, 12 t zGG, 18 t zGG und 26 t zGG eine mittlere Jahresfahrleistung von ca. 40.000 km, in Analogie zur amtlichen Statistik für Lastkraftwagen über 6 t zGG, festgelegt wird. Die der Modellierung zugrunde liegenden und auf Basis empirischer Daten abgeleiteten relativen Häufigkeiten der fahrzeugsegmentspezifischen Jahresfahrleistungscluster im Nah-, Regional- und Fernbereich sind in Abbildung 6.11, Abbildung 6.12 und Abbil-

dung 6.13 veranschaulicht. Die Jahresfahrleistungscluster im Nahbereich variieren in Abhängigkeit der Fahrzeugsegmente und reichen von 1.000 km (3,5 t zGG) bis 80.000 km (40 t zGG). Fahrzeugsegmentspezifisch wurden 9 bis 12 Cluster gebildet.

Abbildung 6.11: Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Nahbereich

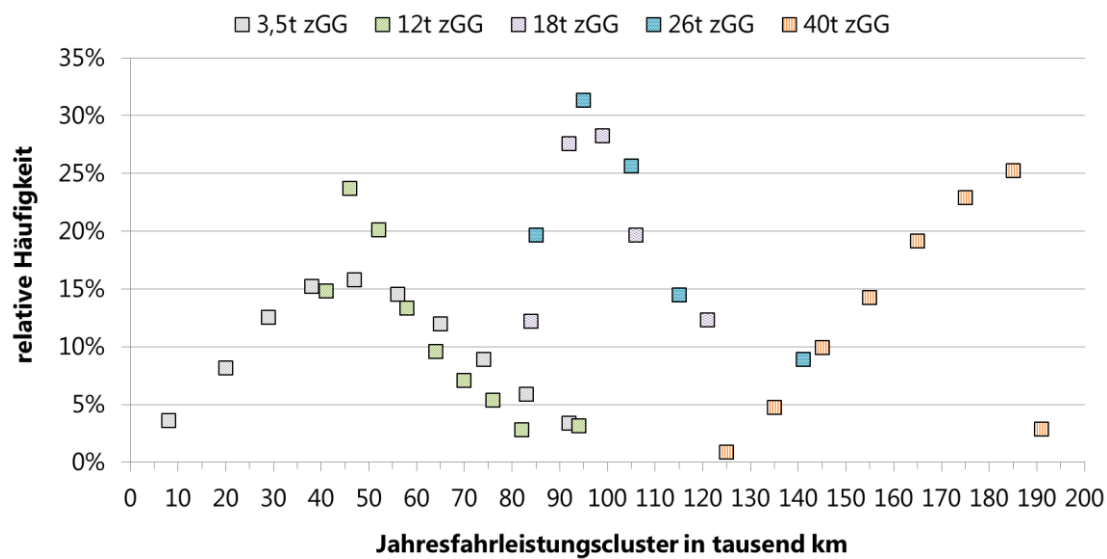


Die Jahresfahrleistungscluster im Regionalbereich reichen von 4.000 km (3,5 t zGG) bis 130.000 km (40 t zGG). Fahrzeugsegmentspezifisch wurden 10 bis 14 Cluster gebildet. Für das Segment 7,5 t zGG wurde nur ein Cluster gebildet, da Fahrten im Regionalbereich nur innerhalb einer Entfernungsstufe durchgeführt wurden.

Abbildung 6.12: Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Regionalbereich


Quelle: eigene Auswertung auf Basis KID-Datensatz und KBA-Sonderauswertung

Die Jahresfahrleistungscluster im Fernbereich reichen von 8.000 km (3,5 t zGG) bis 191.000 km (40 t zGG). Fahrzeugsegmentspezifisch wurden 5 bis 10 Cluster gebildet. Entsprechend der KBA-Sonderauswertung sind von Fahrzeugen des Segments 7,5 t zGG keine Fahrten im Fernbereich durchgeführt worden.

Abbildung 6.13: Relative Häufigkeit der Jahresfahrleistungscluster im Fernbereich

Quelle: eigene Auswertung auf Basis KID-Datensatz und KBA-Sonderauswertung

Die resultierenden mittleren Jahresfahrleistungen beinhaltet Tabelle 6.7. Insgesamt wurde eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den mittleren Jahresfahrleistungswerten der Erhebung „Verkehr in Kilometer der deutschen Kraftfahrzeuge“ erzielt. Unter Berücksichtigung des arithmetischen Mittelwerts der verfügbaren Erhebungsjahre 2013, 2014 und 2015, beträgt die mittlere Jahresfahrleistung von Lastkraftwagen bis 3,5 t zGG ca. 19.200 km und ist somit deutlich geringer im Vergleich zu Lastkraftwagen über 6 t zGG mit ca. 40.000 km. Die mittlere Jahresfahrleistung von Sattelzugmaschinen betrug ca. 102.000 km [176]. Aufgrund des überwiegenden Einsatzes von Fahrzeugen des Segments 7,5 t zGG im Nahbereich (siehe Tabelle 6.1) ist hierbei die mittlere Jahresfahrleistung von Fahrzeugen des Segments 7,5 t zGG höher im Vergleich zu den Segmenten 12 t zGG, 18 t zGG und 26 t zGG. Entfernungsbereichsübergreifend sind die Jahresfahrleistungen zwischen den Segmenten 18 t zGG und 26 t zGG vergleichbar. Deutlich differenzierende Jahresfahrleistungen zeigen die Segmente 3,5 t zGG und 40 t zGG.

Tabelle 6.7: Abgeleitete mittlere Jahresfahrleistungen				
Fahrzeugsegment	Insgesamt	Nahbereich	Regionalbereich	Fernbereich
3,5t zGG	19.200	7.900	24.400	58.900
7,5t zGG	38.600	38.400	55.100	-
12t zGG	42.700	31.400	48.500	55.400
18t zGG	43.600	29.300	71.000	98.700
26t zGG	42.700	29.200	68.200	101.500
40t zGG	103.900	46.000	95.500	168.100
Quellen: Ableitung auf Basis KID-Datensatz und KBA-Sonderauswertung				

6.3 Verifikation und Validierung

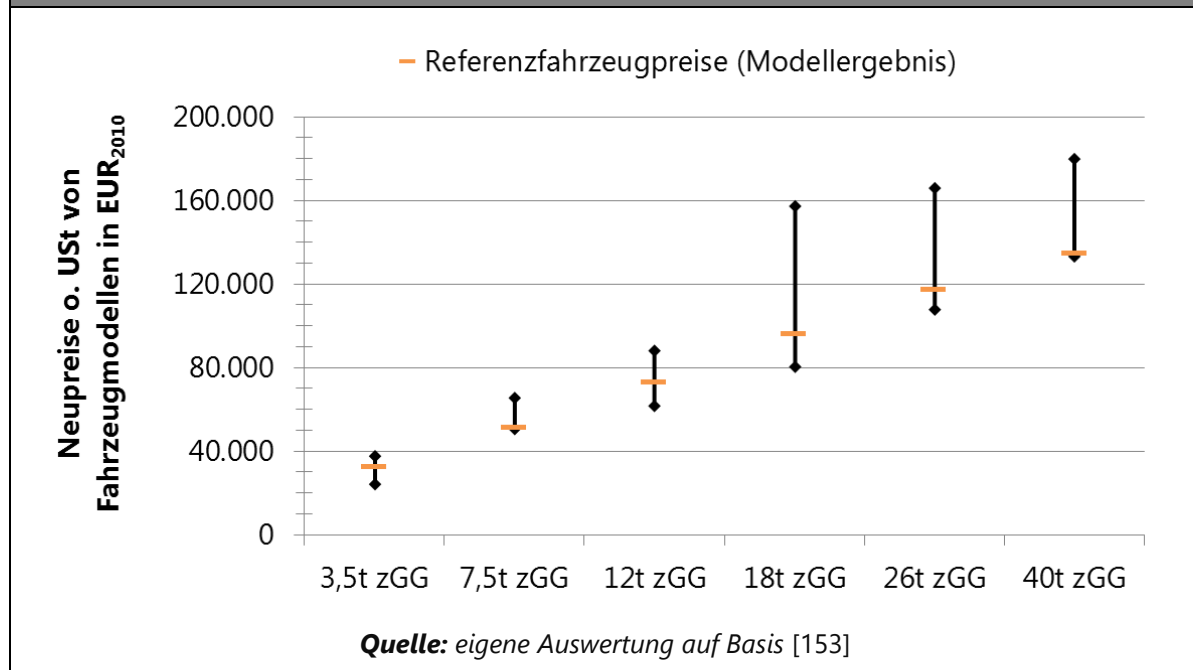
Ein wesentliches Gütekriterium simulativer Analysen ist die Konformität der Modellsimulation mit dem realen Systemverhalten [177]. Diese gilt es mittels Verifikation und Validierung möglichst sicherzustellen. Das Ziel dieses Kapitels ist es, anhand der Verifikation und Validierung die Plausibilität der Szenarioanalysen (siehe Kapitel 7.1, Kapitel 7.2 und Kapitel 7.3) sowie die darauf basierenden wissenschaftlichen Aussagen zu untermauern. In Anlehnung an [178] wird unter Verifikation die Bestätigung der Modellstruktur inkl. des grundlegenden Modellansatzes sowie die Bestätigung der Parameter verstanden. Die Validierung eines Modells ist grundsätzlich nicht absolut definierbar und hat stets modell-individuell zu erfolgen [178]. Grundsätzlich umfasst diese die Bestätigung des Modellverhaltens zur Abbildung des gewünschten Ausschnitts der Realität in angemessener Detaillierung und Genauigkeit. Im vorliegenden Fall kann eine Verhaltensvalidierung ausschließlich mittels der Durchführung univariater Sensitivitätsanalysen erfolgen.

Die Struktur des Szenariomodells folgt in Grundzügen dem Modellierungsansatz nach Mock [130]. Im Rahmen der Umsetzung wurde konsequent das „bottom-up“-Prinzip verfolgt und zur Erkenntnisgenerierung sind anerkannte Methoden angewendet worden. Soweit möglich wurden zur Modellierung fundierte Datensätze herangezogen oder Datensätze erhoben, um die Verwendung von Schätzwerten zu minimieren.

Die für die Modellierung erforderlichen komponentenspezifischen Parameter beruhen weitestgehend auf erhobenen Angaben aus anerkannten wissenschaftlichen Arbeiten und Produktdatenblättern. Der jeweils zugrunde gelegte Median wird demnach als repräsentativ erachtet (siehe Anhang B, Tabellen B.1 bis B.8). Weiterhin wurden detaillierte Kostenmodelle herangezogen, um fundierte Eingangsdaten zu erzeugen (siehe Kapitel 4). Vereinfachend wurde eine lineare Skalierbarkeit komponentenspezifischer Parameter zugrunde gelegt. Der resultierende Streckenverbrauch, basierend auf dem NEFZ-Testzyklus für das Referenzfahrzeug innerhalb des Segments 3,5 t zGG (leichte Nutzfahrzeuge), liegt mit 7,1 l/100 km innerhalb der Bandbreite von Herstellerangaben führender Fahrzeugmodelle (6,8 l/100 km bis 7,4 l/100 km). Die im Rahmen der Modellierung verwendeten Streckenverbräuche basieren jedoch auf dem WLTP-Testzyklus (siehe Kapitel 4.3 und Kapitel 6.2), um realitätsnähere Streckenverbräuche widerzuspiegeln. Für das Referenzfahrzeug ergibt sich demnach mit 7,6 l/100 km ein um 8 % höherer Streckenverbrauch. Ein Vergleich der ermittelten Streckenverbräuche (siehe Kapitel 6.2) mit realen Messdaten für die Referenzfahrzeuge der verbleibenden Segmente (schwere Nutzfahrzeuge) ist aufgrund der im Rahmen von Kapitel 4.3 benannten Gründen nicht durchführbar. Weiterhin ist ein Vergleich der ermittelten Streckenverbräuche mit realen Messdaten für alternative Antriebskonzepte infolge einer beschränkten Fahrzeug- und Datenverfügbarkeit nicht möglich. Auch entsprechen die Ergebnisse der Streckenverbrauchsrechnung einem theoretischen Wert und sind nur unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen gültig. Mögliche Abweichungen sind auf divergierende Fahrprofile, implementierte Betriebsstrategien, Fahrzeugkonfigurationen und Parametrisierungen, wetterbedingte Einflüsse und anderer Faktoren zurückzuführen.

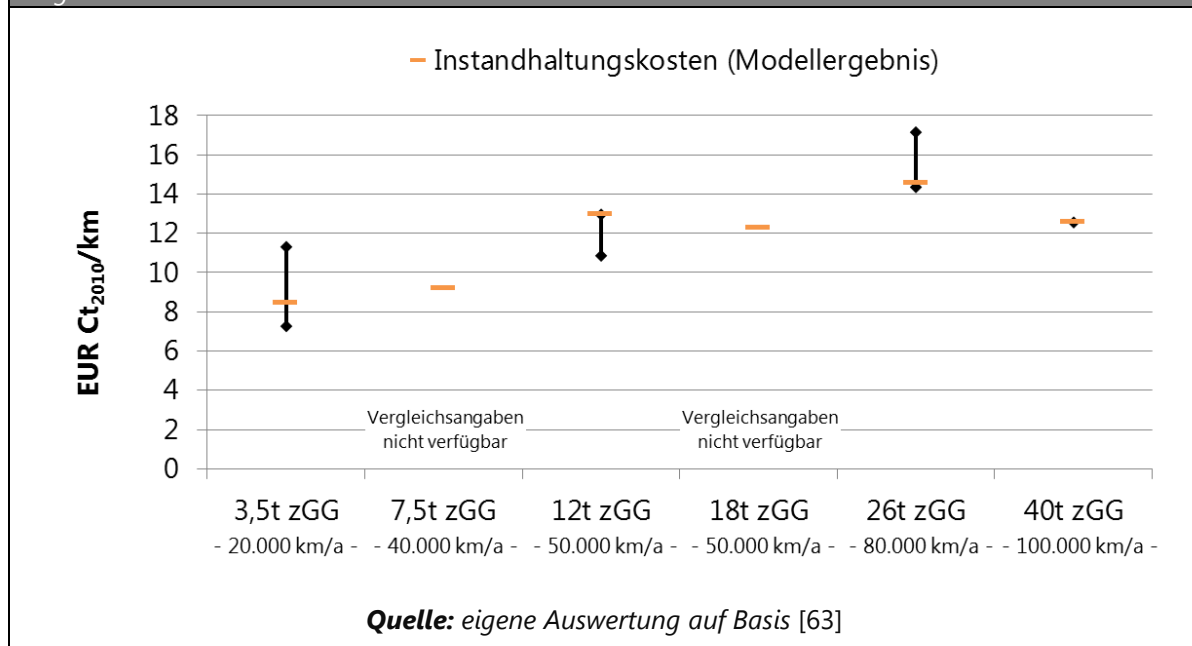
Aus zuvor genannten Gründen ist ein Vergleich der ermittelten Investitionskosten und den Listenpreisen der Hersteller⁴⁵ ausschließlich für das Referenzfahrzeug möglich. Die resultierenden mittleren Investitionskosten (Neupreise) der segmentspezifischen Referenzfahrzeuge spiegeln überwiegend den unteren Listenpreis der Fahrzeuge zum Jahr 2015 in der Standardausstattung wider (siehe Abbildung 6.14). Grundsätzlich ist die Bandbreite der herstellerübergreifenden Listenpreise groß und abhängig vom Fahrgestell, der Motorleistung, dem Fahrerhaus, der Federung, dem Rahmen, des Radstandes und etwaigen Sonderausstattungen.

Abbildung 6.14: Vergleich der ermittelten Neupreise für die Referenzfahrzeuge mit den Listenpreisen der Hersteller



Die Ergebnisse bezüglich der Referenzfahrzeuge, der im Rahmen von Kapitel 4.4.1 vorgestellten Vorgehensweise zur Ermittlung von Instandhaltungskosten zeigen eine gute Übereinstimmung mit Angaben aus der Praxis (siehe Abbildung 6.15).

⁴⁵ Basierend auf dem DAT-Marktspiegel, Lkw und Transporter, Winter 2015/2016 [153], wurden die Neupreise von EUR VI Fahrzeugen zum Jahr 2015 herangezogen. Hinsichtlich der betrachteten Fahrzeugmodelle wurde sich an den für die Fahrzeugkonfiguration berücksichtigten Fahrzeugmodellen orientiert (siehe Anhang B, Tabellen B.9 bis B.14). Bezüglich des Segments 40 t zGG wurde zusätzlich der Preis eines Sattelauflegers in Höhe von 23.005 EUR (siehe Kapitel 4.4) berücksichtigt.

Abbildung 6.15: Vergleich der ermittelten Instandhaltungskosten für die Referenzfahrzeuge mit Angaben aus der Praxis

Eine Verifizierung der Ergebnisse für alternative Antriebskonzepte ist aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht möglich und kann erst erfolgen sofern Realdaten vorliegen. Jedoch wurden die resultierenden Ergebnisse⁴⁶ im Rahmen von Expertengesprächen im Wesentlichen bestätigt.

Die Wertverlustverläufe der Referenzfahrzeuge wurden auf Basis von Marktdaten bestimmt (siehe Kapitel 4.4.2). Eine Verifizierung der Wertverlustverläufe für alternative Antriebskonzepte ist aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht möglich. Daher werden die auf Basis der in Kapitel 4.4.2 vorgestellten Vorgehenssystematik zur Abschätzung von Restwerten ermittelten Ergebnissen als plausibel angesehen. Die Parameter zur Infrastrukturdichte und zum technologischen Reifegrad entsprechen dabei Schätzwerten.

Das Technologieportfolio je Fahrzeugsegment basiert auf einer Metaanalyse anerkannter Studien hinsichtlich Einzeltechnologien und Maßnahmen inklusive deren Kosten und Verbrauchsreduktionspotentialen (siehe Anhang E, Tabellen E.1 bis E.7). Aus

⁴⁶ siehe hierzu [Kleiner & Friedrich 2017a]

den zu Beginn des Kapitels 4.3 benannten Gründen werden die erhobenen Verbrauchsreduktionspotentiale nicht verwendet. Diese sind mittels der im Rahmen von Kapitel 4.3 vorgestellten Vorgehenssystematik bestimmt worden und entsprechen theoretischen Potentialen, welche nur unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen Gültigkeit besitzen. Dabei erfolgte eine umfassende (spezifiziert nach Fahrzeugsegment) und detaillierte (differenziert nach verschiedenen Fahrzyklen: städtischer Zyklus, regionaler Zyklus und Autobahnzyklus) Analyse der Streckenverbräuche sowie der Verbrauchsreduktionspotentiale von Technologieelementen. In Analogie zur Ermittlung der Energieverbräuche von alternativen Antriebskonzepten sind mögliche Abweichungen auf divergierende Fahrprofile, implementierte Betriebsstrategien, Fahrzeugkonfigurationen und Parametrisierungen, wetterbedingte Einflüsse usw. zurückzuführen.

Hinsichtlich der zulässigen Amortisationsdauer von Flottenbetreibern und bezüglich der Ableitung von Jahres- bzw. Tagesfahrleistungen wurden empirisch erhobene Daten herangezogen. Wie im Rahmen von Kapitel 6.1.2 bereits erwähnt, wird die Amortisationsdauer als ein maßgebliches Kriterium bei der Adoptionsentscheidung alternativer oder zusätzlicher Technologieoptionen erachtet. Die Ergebnisse der herangezogenen Umfrage sind aufgrund des eher geringen Stichprobenumfangs ($n=119$, siehe Kapitel 2.2, Abbildung 2.5, im Verhältnis zu ca. 50.000 gelistete Unternehmen im gewerblichen Güterkraftverkehr) als Anhaltspunkte zu verstehen. Weitere und umfangreichere empirische Studien bzw. Erhebungen zur Amortisationsdauerbereitschaft von in Deutschland ansässigen Unternehmern im gewerblichen Güterkraftverkehr sind nicht bekannt. Wie im Rahmen von Kapitel 6.1.2 erläutert, basieren die Angaben zur Jahres- bzw. Tagesfahrleistung auf Basis der Erhebungen zum „*Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland*“, zum „*Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge*“ und zum „*Verkehr in Kilometer der deutschen Kraftfahrzeuge*“. Diese Erhebungen werden als repräsentativ für Deutschland angesehen und beziehen sich jeweils auf belastbare Datengrundlagen (siehe Kapitel 6.2).

Grundsätzlich sind Erhebungen und darauf basierende Hochrechnungen mit Zufallsfehlern behaftet. Bezüglich der Abschätzung der jeweiligen Zufallsfehler wird auf das jeweilige Methodenband verwiesen [179], [180]. Ebenso mit Unsicherheiten verbunden, sind die wie im Rahmen von Kapitel 6.1.2 erläuterten und für die Modellierung abgeleiteten Häufigkeitsverteilungen der Jahresfahrleistungscluster.

Eine Bestätigung der Modellresultate anhand der historischen Marktentwicklung von alternativen Antriebskonzepten kann nicht erfolgen, da faktisch kein Markt und damit keine Bezugsdaten existieren. Auch kann aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit keine Validierung anhand der historischen Marktentwicklung richtungsweisender technologischer Entwicklungen wie z.B. der Common-Rail-Einspritzung erfolgen. Eine Bestätigung der Modellresultate anhand der historischen Marktentwicklung des Dieselantriebsstrangs wird als nicht zielführend angesehen, da dies kein Beweis für die Korrektheit der induktiv modellierten Ergebnisse von alternativen Antriebskonzepten unter zukünftig antizipierten Rahmenbedingungen sein kann. Der Fokus der Verhaltensvalidierung liegt somit auf univariaten Sensitivitätsanalysen mit dem Ziel die Robustheit des Modellierungsansatzes und der resultierenden Ergebnisse gegenüber Unsicherheiten hinsichtlich der Szenarioannahmen zu prüfen. Dabei wird die Differenz der Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Vergleich zum Referenzszenario „*moderate Trendentwicklung*“ (siehe Kapitel 7.1) unter plausibler Variation einzelner Eingangsparameter untersucht. Insgesamt wurden 15 Sensitivitätsanalysen durchgeführt (siehe Tabelle 6.8).

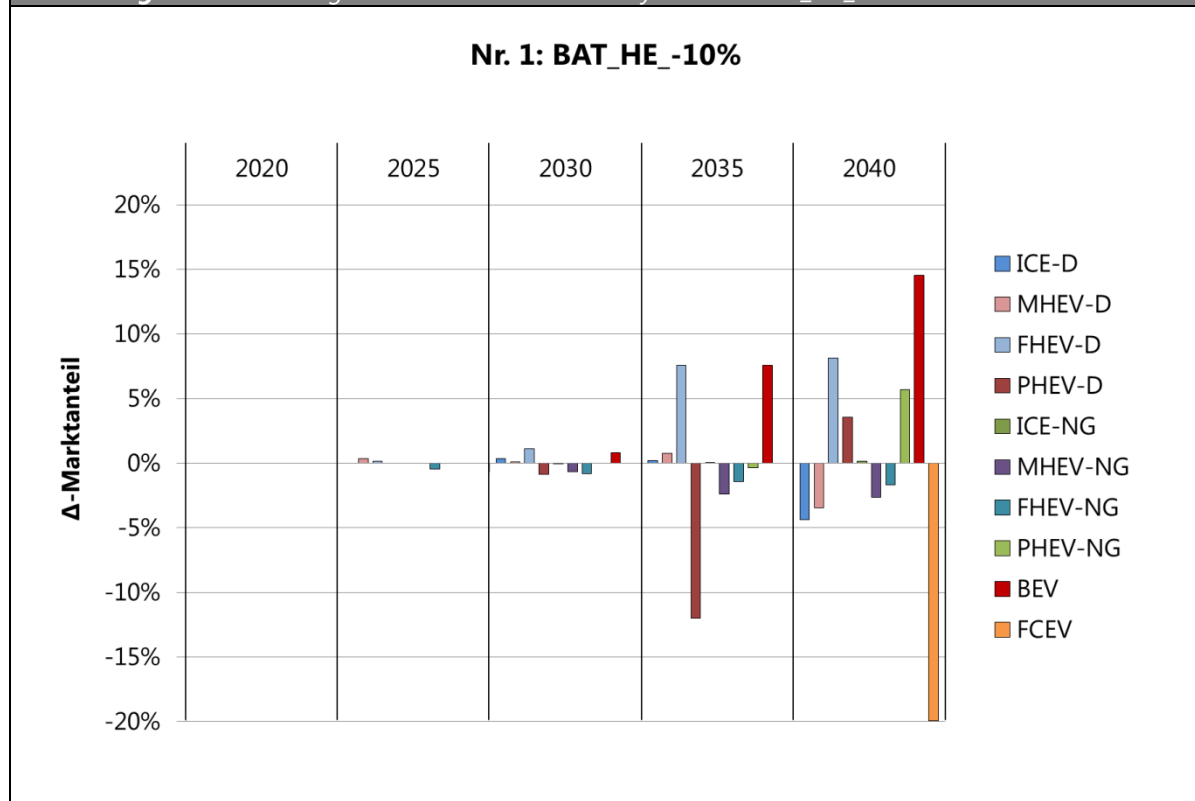
Tabelle 6.8: Durchgeführte Sensitivitätsanalysen inkl. der jeweiligen Parametervariation

Nr.	Bezeichnung	Parametervariation
1	BAT_HE_-10%	Kostenreduktion des Batteriesystemtyps Hochenergie um 10%
2	BAT_HE_+10%	Kostensteigerung des Batteriesystemtyps Hochenergie um 10%
3	BAT_HL_-10%	Kostenreduktion des Batteriesystemtyps Hochleistung um 10%
4	BAT_HL_+10%	Kostensteigerung des Batteriesystemtyps Hochleistung um 10%
5	CO ₂ -Zielwert_-10%	Reduktion der CO ₂ -Flottenzielwerte um 10%
6	CO ₂ -Zielwert_+10%	Erhöhung der CO ₂ -Flottenzielwerte um 10%
7	CNG_-10%	Reduktion des Erdgaspreises um 10%
8	CNG_+10%	Steigerung des Erdgaspreises um 10%
9	Diesel_-10%	Reduktion des Dieselpreises um 10%
10	Diesel_+10%	Steigerung des Dieselpreises um 10%
11	H ₂ _-10%	Reduktion des Wasserstoffpreises um 10%
12	H ₂ _+10%	Steigerung des Wasserstoffpreises um 10%
13	Strom_-10%	Reduktion des Strompreises um 10%
14	Strom_+10%	Steigerung des Strompreises um 10%
15	Amortisationsdauer +1 Jahr	Erhöhung der akzeptablen Amortisationsdauer je Kundentyp um 1 Jahr

Die Parametervariationen mit den Nummern 1, 5, 6, 9 und 15 resultieren in differierenden Marktanteilen hinsichtlich einzelner Betrachtungsjahre und Fahrzeugkonzepten in Höhe von mindestens |5%| (siehe Abbildung 6.16, Abbildung 6.17, Abbildung 6.18, Abbildung 6.19 und Abbildung 6.20). Wie zuvor erwähnt, beziehen sich die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen auf das Modellergebnis für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt (LNF & SNF) im Referenzszenario „*moderate Trendentwicklung*“ (siehe Kapitel 7.1.2, Abbildung 7.1). Die soeben nicht benannten Sensitivitätsanalysen resultieren in geringfügig differenzierenden Marktanteilen (kleiner als |5%|). Die zugrunde gelegte Variation dieser Parameter beeinflusst daher in untergeordneter Weise die Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte, weshalb diese Ergebnisse nicht aufgezeigt und weiter erläutert werden.

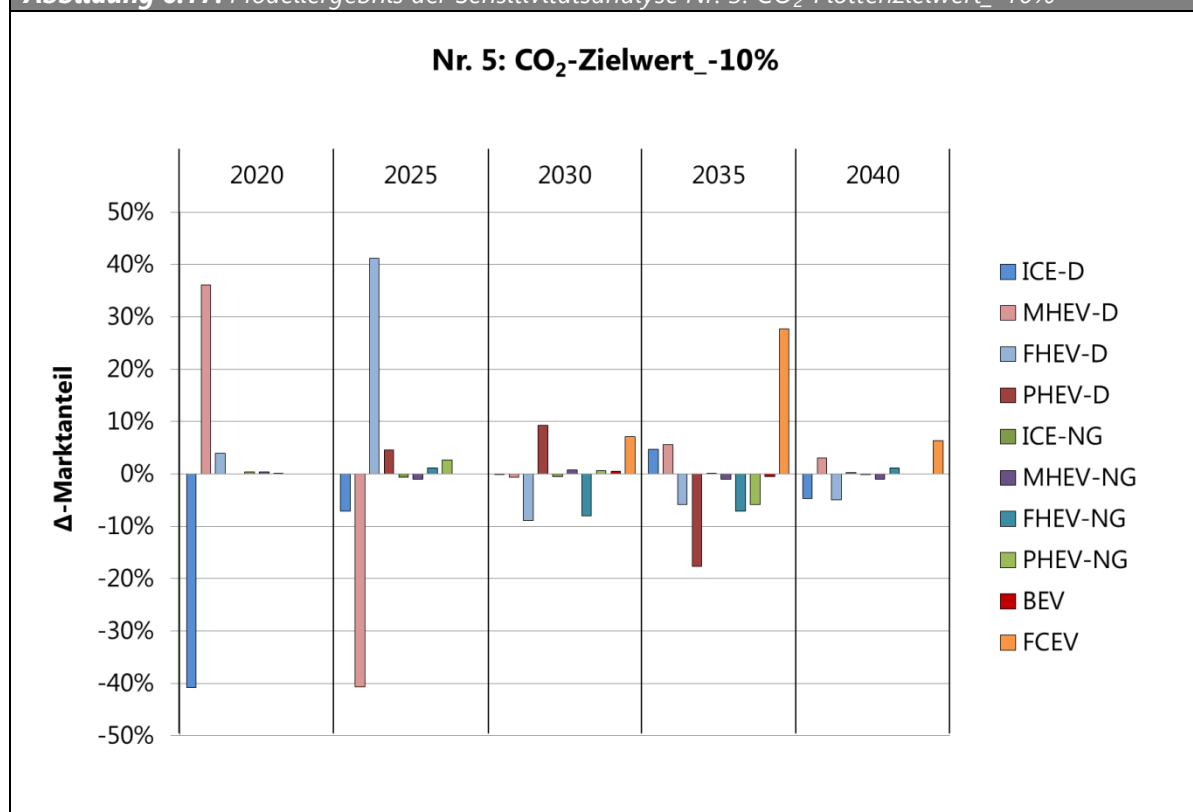
Die Reduktion des Batteriepreises vom Typ Hochenergie um 10 % führt aufgrund der Kostenreduktion zu einer verbesserten Konkurrenzfähigkeit batterieelektrischer Fahrzeugkonzepte. Dies bedingt einen frühzeitigeren Markteintritt sowie eine fortwährende Marktdurchdringung bis zum Jahr 2040. Wesentliche Marktanteile werden in den Jahren 2035 und 2040 erreicht. Diese gehen hauptsächlich zu Lasten der Marktanteile von PHEV-D und FCEV-Fahrzeugkonzepten (siehe Abbildung 6.16).

Abbildung 6.16: Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 1: BAT_HE_-10%



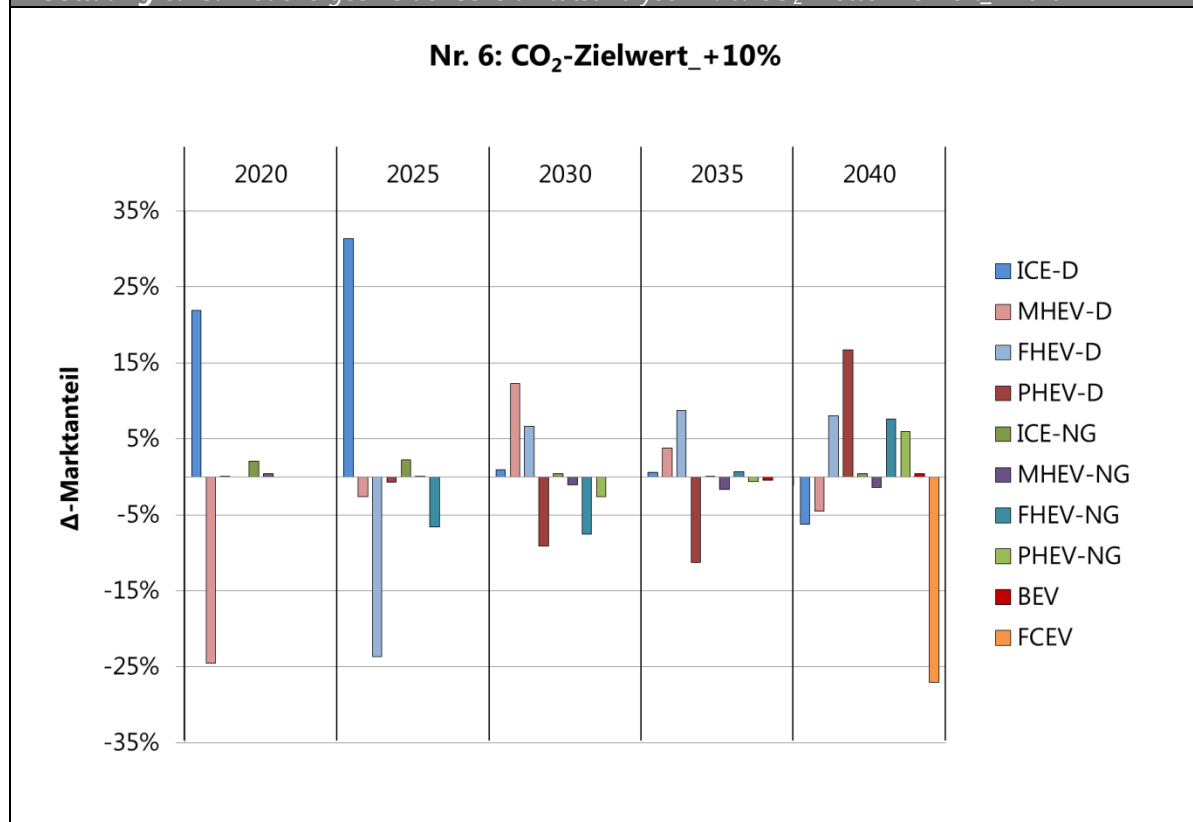
Einen signifikanten Einfluss auf die Marktdiffusion elektrifizierter Antriebsstrangkongzepte zeigt die Reduktion der dem Referenzszenario zugrunde gelegten und fahrzeugsegmentspezifischen CO₂-Flottenzielwerten um 10 %. Eine zunehmende Verschärfung der Zielwerte geht demnach einher mit in Summe höheren Marktpotentialen für MHEV-D, FHEV-D und FCEV-Fahrzeugkonzepten. An Marktanteilen verlieren hauptsächlich ICE-D- Fahrzeugkonzepte aufgrund einer höheren Differenz der TtW-CO₂-Emissionen zum geforderten Zielwert und der damit verbundenen höheren CO₂-Abgabe. Auch zeigt sich, dass ein starker Zuwachs an FCEV-Fahrzeugkonzepten zu Lasten von FHEV- und PHEV-Konzepten geht. ICE-D- und MHEV-D-Fahrzeugkonzepte profitieren dabei aufgrund des sich ergebenden Emissionsspielraums (siehe Abbildung 6.17).

Abbildung 6.17: Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 5: CO₂-Flottenzielwert_-10%



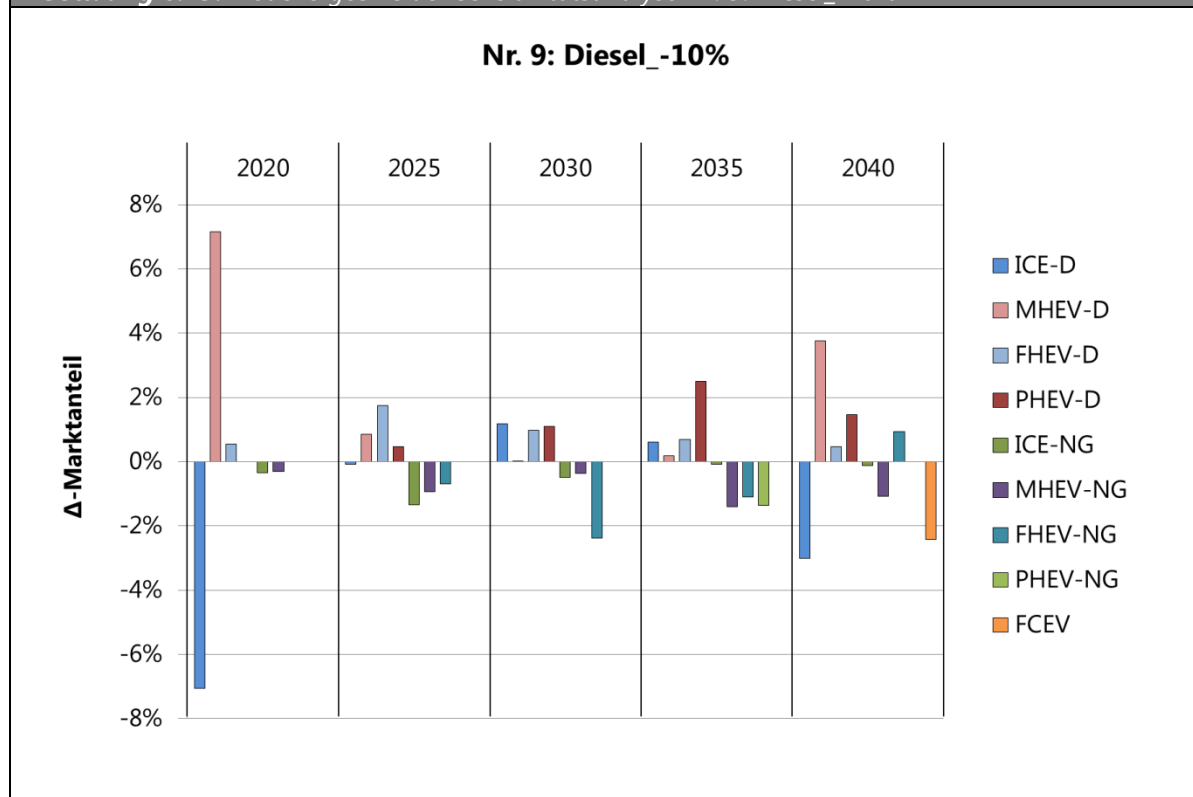
Eine Erhöhung der zugrunde gelegten CO₂-Flottenzielwerte um 10 % verzögert den Markteintritt und die Marktdiffusion batterieelektrischer Fahrzeugkonzepte. FCEV-Fahrzeugkonzepte erreichen keine Wettbewerbsfähigkeit und sind somit für die CO₂-Zielwerterreichung nicht erforderlich. In Summe profitieren aufgrund der höheren CO₂-Zielwerte im Wesentlichen ICE-D-Fahrzeugkonzepte. Damit einher geht eine in Summe geringere Marktdiffusion der elektrifizierten Fahrzeugkonzepte MHEV, FHEV und PHEV (siehe Abbildung 6.18).

Abbildung 6.18: Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 6: CO₂-Flottenzielwert_ + 10%



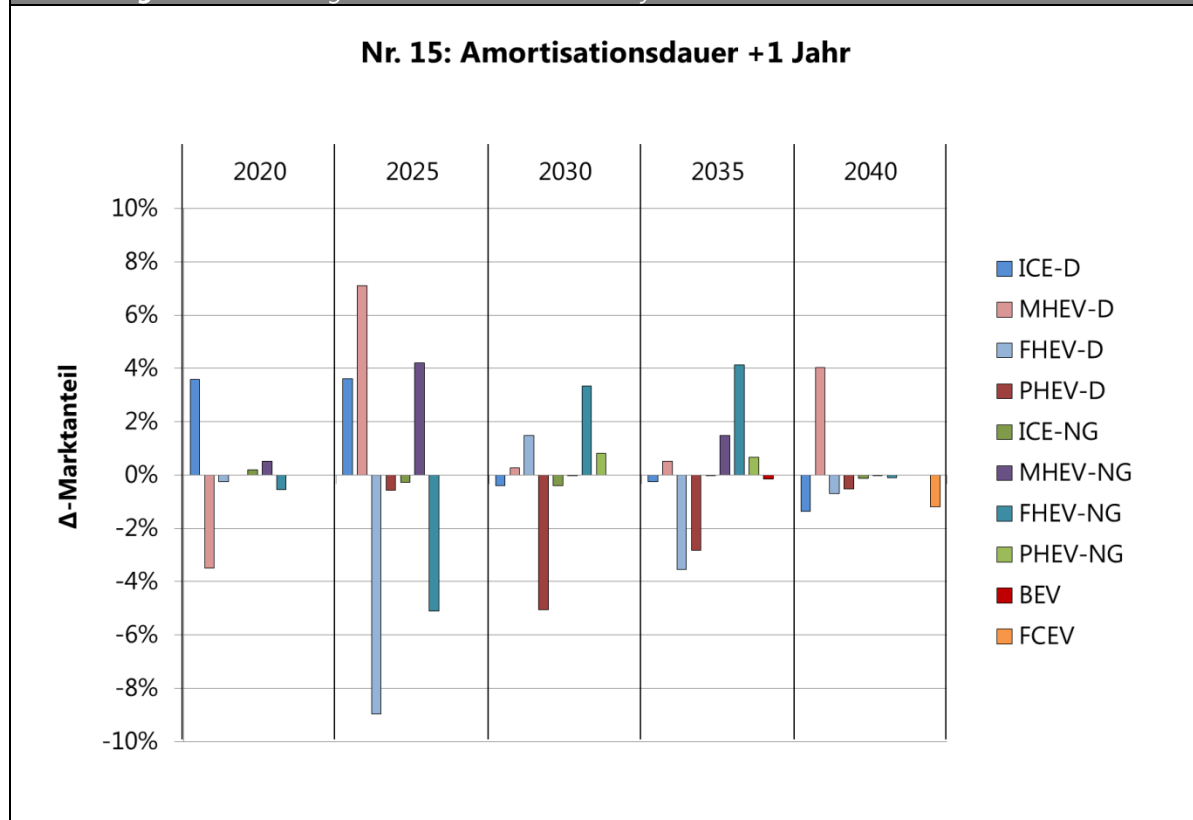
Die Reduktion des Dieselpreises um 10 % verhilft den elektrifizierten Antriebskonzepten MHEV-D, FHEV-D und PHEV-D in Summe zu höheren Marktanteilen. Die Reduktion der laufenden Kosten verringert die Amortisationsdauer und steigert die Konkurrenzfähigkeit in dem Maße, sodass die benannten Fahrzeugkonzepte für eine erweiterte Anzahl an Agenten die kostenoptimale Antriebslösung darstellen. Diese Entwicklung geht hauptsächlich zu Lasten der Antriebskonzepte ICE-NG, MHEV-NG, FHEV-NG und FCEV (siehe Abbildung 6.19).

Abbildung 6.19: Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 9: Diesel_L -10%



Die Erhöhung der akzeptablen Amortisationsdauer je Kundentyp um ein Jahr resultiert in Summe insbesondere in einer Erhöhung der Marktanteile für die ICE-D-, MHEV-D- sowie MHEV-NG-Fahrzeugkonzepte und geht hauptsächlich zu Lasten der Konzepte FHEV-D- und PHEV-D. Die nun höheren akzeptablen Amortisationsdauern führen zum einen dazu, dass nun mehr Käufer-Agenten Technologieelemente auswählen und zum anderen diejenigen Käufer-Agenten die bereits Technologieelemente ausgewählt haben sich für weitere Technologieelemente entscheiden. Hierdurch reduziert sich der Endenergieverbrauch der Neuzulassungsflotte und damit verbunden die TtW-CO₂-Flottenemissionen. Dies wiederum bewirkt eine geringere CO₂-Abgabe und steigert damit die Konkurrenzfähigkeit der ICE-D-, MHEV-D und MHEV-NG-Fahrzeugkonzepte. Die CO₂-Flottenzielwerte werden demnach durch höhere Marktanteile dieser Fahrzeugkonzepte mit geringerem Energieverbrauch erreicht (siehe Abbildung 6.20).

Abbildung 6.20: Modellergebnis der Sensitivitätsanalyse Nr. 15: Amortisationsdauer +1 Jahr



Zusammenfassend konnte, aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit, eine erfolgreiche Verifizierung von Modellparametern und Modellresultaten nur in einem begrenzten Umfang durchgeführt werden. Vor diesem Hintergrund wurden insbesondere kritische Modellparameter weiter erläutert und dabei auf mögliche Unsicherheiten hingewiesen. Schließlich zeigten die Resultate der Sensitivitätsanalysen plausible Ergebnisse. Somit werden die Verifikation und Validierung von Modellparametern und Ergebnissen als ausreichend und zufriedenstellend für die systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte angesehen.

7 Szenarioanalysen bis zum Jahr 2040

Unter Einsatz des im vorangegangenen Kapitel entwickelten Szenariomodells wird im Folgenden anhand von drei Szenarien die Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte vom Jahr 2015 bis zum Jahr 2040 analysiert. Die Analysen beziehen sich dabei auf den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland.

Die Analyseergebnisse kommen keinen quantitativen Zukunftsprognosen gleich. Szenarien sind als Aufzeichnung möglicher episodischer Abfolge von Ereignissen eines besonders interessierenden Systemaspekts zu verstehen [181]. Das grundsätzliche Ziel ist es, mögliche Entscheidungsalternativen und die resultierenden Folgebündel in einem komplexen System aufzuzeigen, um Handlungsoptionen abzuleiten. Die spezifischen Ziele sind, zum einen vielversprechende Anwendungsfälle für alternative Antriebskonzepte und die treibenden Fahrzeugsegmente zu identifizieren und zum anderen die Potentiale zur Reduktion des Endenergieverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen aufzuzeigen. Weiterhin werden die Kostenveränderungen der Neuwagenflotte im Zuge der Entwicklung der CO₂-Emissionen aufgezeigt. Ebenso wird der Einfluss möglicher Synergieeffekte, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, thematisiert. Auch wird auf die Marktdurchdringung von Technologieelementen eingegangen und dabei das autonome Fahren aufgegriffen. Hierzu wird das jeweilige Szenario beschrieben und anschließend die Ergebnisse ausgewertet und anhand der erläuterten Zielsetzungen diskutiert. Abschließend werden die Untersuchungsergebnisse mit anderen Studien verglichen. Die im Folgenden beschriebenen Szenarien sind in enger Anlehnung an die DLR-Szenarien im Projekt Verkehrsentwicklung und Umwelt (VEU)⁴⁷ entstanden.

⁴⁷ Das institutionell geförderte Projekt Verkehrsentwicklung und Umwelt (VEU) am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) ist ein Projekt von zwölf Instituten der Helmholtz-Gemeinschaft. Es zielt darauf ab, verschiedene zukünftige Entwicklungspfade des Verkehrssystems in Deutschland 2040 unter ökologischen und gesellschaftlichen Gesichtspunkten zu analysieren [182], [183].

7.1 Referenzszenario „moderate Trendentwicklungen“

7.1.1 Szenariobeschreibung

Ausgangspunkt stellt das Referenzszenario „*moderate Trendentwicklungen*“ dar. Charakteristisch für das Referenzszenario ist eine moderate Entwicklung der heute zu beobachtenden Trends ohne umfassende Impulse ausgehend aus der Regierung, der Technologieentwicklung oder von den Käufer-Agenten. So wird für die zukünftige Entwicklung des Ölpreises⁴⁸ das Szenario, welches der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 zugrunde liegt, verwendet [184]. Die Tankstellenpreise für Diesel ergeben sich in Abhängigkeit des Rohölpreises auf Basis eines funktionellen Zusammenhangs gegeben in [130]. Der Dieselmotorkraftstoff unterliegt dabei einer durchschnittlichen realen Preissteigerung von 1,7 % pro Jahr. Zusätzlich wird ein Rabatt in Höhe von 5 % für Großverbraucher berücksichtigt. Die Preise für komprimiertes Erdgas (CNG) basieren auf [185]. Für verflüssigtes Erdgas (LNG) wird der Differenzbetrag zu CNG aus [186] herangezogen. Entsprechend der zweiten Änderung des Energie- und Stromsteuergesetzes wird die steuerliche Vergünstigung für Erdgas bis zum Jahr 2026 fortgeführt [187]. Wasserstoff und Strom bleiben von der Energiesteuer befreit. Für die Annahme zur zukünftigen Entwicklung der Strompreise wird auf die Studie „*Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*“ [188] zurückgegriffen. Die Entwicklung der Wasserstoffpreise basiert auf der Studie „*A portfolio of powertrains for Europe: a fact-based analysis*“ [189]. Ebenso werden den genannten Studien die jeweiligen WtT-CO₂-Intensitäten entnommen. Hinsichtlich der CO₂-Regulierung wird von der aktuellen Gesetzeslage ausgegangen und diese weiter fortgeschrieben. Für Fahrzeuge der Klasse N₁ gilt ab dem Jahr 2017 ein Zielwert für die Neuwagenflotte in Höhe von 175 g/km. Ab dem Jahr 2020 wird dieser Zielwert verschärft und beträgt 147 g/km [170]. Diese Angaben entsprechen den geforderten Zielwerten unter Berücksichtigung der Energieverbräuche ermittelt auf Basis des NEFZ. Die den Szenarioanalysen

⁴⁸ Bis zum Jahr 2016 werden reale Preise verwendet. Sind in der Primärquelle Werte für einzelne Jahre z.B. 2020, 2025 und 2030 gegeben, wird für die Parametrisierung des Modells grundsätzlich linear zwischen den vorhandenen Stützstellen inter- bzw. extrapoliert.

zugrunde gelegten Energieverbräuche wurden jedoch auf Basis des WLTP ermittelt, weshalb ein Korrelationsfaktor in Höhe von 1,15 zur Anwendung kommt [190]. Entsprechend des aktuellen Vorschlags zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge nach dem Jahr 2020 wird für das Jahr 2025 ein Minderungsziel von 15 % und für das Jahr 2030 ein Minderungsziel von 30 % basierend auf den Flottenemissionen des Jahres 2021 festgelegt [191]. Darüber hinaus wurden noch keine Festlegungen getroffen. Dennoch wird von einer weiteren Verschärfung ausgegangen und zum Jahr 2040 ein Minderungsziel von 40 % basierend auf den Flottenemissionen des Jahres 2021 antizipiert. Demgegenüber ist eine CO₂-Regulierung für die Fahrzeugklassen N₂ und N₃ inexistent. Entsprechend des aktuellen Vorschlags zur Festsetzung von Emissionsnormen für schwere Nutzfahrzeuge wird zum Jahr 2025 ein Minderungsziel in Höhe von 15 % und zum Jahr 2030 ein Minderungsziel in Höhe 30 % basierend auf den Flottenemissionen des Jahres 2019 zugrunde gelegt [192]. Darüber hinaus wurden noch keine Festlegungen getroffen. Dennoch wird von einer weiteren Verschärfung ausgegangen und zum Jahr 2040 ein Minderungsziel von 40 % basierend auf den Flottenemissionen des Jahres 2019 antizipiert. Seit Juli 2016 wurde zur Förderung der Elektromobilität eine zeitlich befristete Kaufprämie in Höhe von 4.000 EUR bzw. 3.000 EUR für den Fahrzeugtyp REEV, BEV, FCEV bzw. PHEV verabschiedet. Diese wird ausschließlich für die Fahrzeugklassen M₁ (Pkw), N₁ (leichte Nutzfahrzeuge) und N₂ (schwere Nutzfahrzeuge mit Einschränkung⁴⁹) gewährt und endet voraussichtlich zum Jahr 2019 [193]. Darüber hinaus wurde seit Juli 2018 ebenso eine bis zum Jahr 2020 befristete Kaufprämie für schwere Nutzfahrzeuge der Klassen N₂ und N₃ verabschiedet. Diese sieht eine pauschale Bezuschussung in Höhe von 8.000 EUR für mit komprimiertem Erdgas (CNG) betriebenen Lkw und Sattelzugmaschinen vor. Mit flüssigem Erdgas betriebene (LNG) Lkw und Sattelzugmaschinen erfahren eine Bezuschussung in Höhe von 12.000 EUR. Die Bezuschussung von batterieelektrisch betriebenen (BEV, REEV und FCEV) Lkw und Sattelzugmaschinen variiert in Abhängigkeit des zulässigen Gesamtgewichts. Fahrzeuge bis 12 t zGG werden mit

⁴⁹ Soweit diese mit einer Fahrerlaubnis der Klasse B geführt werden dürfen (möglich bis 4.250 kg zGG)

12.000 EUR und Fahrzeuge mit einem zGG größer als 12 t werden mit 40.000 EUR bezuschusst [194]. Ab dem Jahr 2019 sind Elektro-Lkw zudem von der Lkw-Maut befreit [195]. In Anlehnung an das Kraftfahrzeugsteuergesetz sind für Elektrofahrzeuge bis zum Jahr 2030 keine Kfz-Steuern zu entrichten. Weiterhin wird im Rahmen der Kostenbetrachtung für die Fahrzeugtypen PHEV, BEV und REEV die Anschaffung und Unterhaltung einer EVSE berücksichtigt. Die zugrunde gelegten Investitionen sind dabei abhängig von der benötigten Ladeleistung um innerhalb von 15 Stunden⁵⁰ die Batterie vollständig zu laden. Hinsichtlich der Infrastrukturdichte und des technologischen Reifegrades alternativer Antriebskonzepte wird von einer moderaten Entwicklung ausgegangen. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Annahmen beinhaltet Tabelle 7.1.

⁵⁰ 1-Schicht Betrieb von 8:00 Uhr bis 17:00 Uhr

Tabelle 7.1: Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“

	Parameter	Einheit	2015	2020	2025	2030	2035	2040	Quellen und Anmerkungen
Energiepreise (ohne MWST)	Ölpreis	USD/bbl	52	100	110	120	130	141	[182]
	Dieselpreis	EUR/l	0,91	0,96	1,15	1,20	1,25	1,30	Regression auf Basis [182] inkl. 5% Rabatt
	Erdgaspreis (CNG)	EUR/kg	0,90	0,93	0,94	1,03	1,04	1,05	[183], Steuermaßnahme bis 2026
	Erdgaspreis (LNG)	EUR/kg	1,01	1,04	1,05	1,12	1,13	1,14	[183], Differenz zu CNG Preis in Anlehnung an [184]
	Strompreis	EUR/kWh	0,21	0,23	0,25	0,22	0,22	0,21	[186]
	Wasserstoffpreis	EUR/kg	9,91	6,60	5,51	5,00	5,00	5,00	[187]
CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Flottenzielwerte LNF								
	3,5t zGG	g/km	-	169	144	118	110	101	[168], [188], [189], Fortschreibung
	CO ₂ -Flottenzielwerte SNF								
	7,5t zGG	g/km	-	272	237	195	180	167	[190], Fortschreibung
	12t zGG	g/km	-	406	354	291	271	250	
	18t zGG	g/km	-	656	572	471	437	404	
	26t zGG	g/km	-	737	643	529	492	454	
	40t zGG	g/km	-	808	705	580	540	497	
	Startwert CO ₂ -Abgabe	EUR/(g/km)	0		95				[168]
	WtT-CO ₂ -Intensität Diesel	g/MJ	18	17	17	16	16	16	[183]
	WtT-CO ₂ -Intensität CNG	g/MJ			9				[183]
	WtT-CO ₂ -Intensität LNG	g/MJ			28				in Anlehnung an [184]
	WtT-CO ₂ -Intensität Strom	g/MJ	126	88	72	55	37	19	in Anlehnung an [186]
	WtT-CO ₂ -Intensität Wasserstoff	g/MJ	103	73	35	21	14	7	[187]
Transportaufgabe	Streckenanteile Güterverkehr im Nahbereich								
	urban	%			80				Modellannahme
	regional	%			20				
	Autobahn	%			0				
	Streckenanteile Güterverkehr im Regionalbereich								
	urban	%			20				Modellannahme
	regional	%			70				
	Autobahn	%			10				
	Streckenanteile Güterverkehr im Fernbereich								
	urban	%			0				Modellannahme
sonstige Modellannahmen	regional	%			20				
	Autobahn	%			80				
	Zinssatz	%			4,2				[173]
	RPE	-			1,45				Modellannahme auf Basis von [25], [33], [123]
	Synergieeffekte Pkw-Markt	-			nein				Modellannahme
	Akzeptanz geringer bzw. negativer Margen	-			nein				Modellannahme
	Fahrzeughaltedauer								
	LNF	Jahre			6				[171]
	SNF	Jahre			5				
	Steuerbefreiung								
	LNF	-			bis 2030 (REEV/BEV/FCEV)				[136]
	SNF	-			bis 2030 (REEV/BEV/FCEV)				
	Kaufprämie								
	LNF	-			2016-2019: - 4.000 EUR - REEV/BEV/FCEV - 3.000 EUR - PHEV				[191]
	SNF	-			2018-2019: - 8.000/12.000 EUR - CNG/LNG - bis 12t zGG: 12.000 EUR - REEV/BEV/FCEV - ab 12t zGG: 40.000 EUR - REEV/BEV/FCEV				[192]
	Mautbefreiung								
	SNF	-			ab 2019 (REEV/BEV/FCEV)				[193]
Kundentyp	geforderte Amortisationsdauer								
	Innovator	Jahre			Fzg.-Haltedauer				Modellannahme
	aufgeschlossener Anwender	Jahre			4				
	konservativer Anwender	Jahre			2				
	Zweifler	Jahre			1				

7.1.2 Szenarioergebnisse

Das Modellergebnis für die zeitliche Entwicklung des Güterkraftverkehrs-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) für sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge ist innerhalb Abbildung 7.1 für die Jahre 2015, 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040 darge-

stellt⁵¹. Dabei sind die Marktanteile sowohl hinsichtlich der sechs Fahrzeugsegmente als auch bezüglich der drei Transportaufgaben aggregiert dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass hybridelektrische Fahrzeugkonzepte, insbesondere MHEV und FHEV, eine wesentliche Rolle hinsichtlich der Erreichung gegebener Flottenzielwerte spielen. Der im Vergleich zu konventionellen Antriebskonzepten geringere Kraftstoffverbrauch hybridelektrischer Fahrzeugkonzepte, erreicht durch die Nutzung der antriebsstrangbedingten Vorteile, ermöglicht dabei hauptsächlich die Senkung der TtW-CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte. Zum Jahr 2025 erreicht der Marktanteil von MHEV-Fahrzeugkonzepten bereits den Höchststand und beträgt 56 %. Mit zunehmender Verschärfung der Zielwerte geht eine zunehmende Nachfrage nach den Fahrzeugkonzepten mit einem höheren Elektrifizierungsgrad (FHEV und PHEV) einher. Dieser variiert zwischen 1 % und 76 % für FHEV-Fahrzeugkonzepte und zwischen 1 % bis 24 % für PHEV-Fahrzeugkonzepte. Die Anforderungen an die Reduktion der flotten-spezifischen TtW-CO₂-Emissionen erfordern nun Fahrzeugkonzepte mit einem entsprechend geringen Kraftstoffverbrauch. Dabei zeigt sich, dass FHEV-Fahrzeugkonzepte ein geeignetes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen und einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der TtW-CO₂-Flottenemissionen leisten. PHEV-Fahrzeugkonzepte stellen eine Brückentechnologie dar und werden durch den Markteintritt von Brennstoffzellenfahrzeugen verdrängt. Der signifikante Erfahrungskurveneffekt des Brennstoffzellensystems, im Vergleich zu den moderaten Erfahrungskurveneffekten der Batteriesysteme, sowie der vorteilhafte Wasserstoffpreis ermöglicht die Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenfahrzeugen gegenüber PHEV- und BEV-Fahrzeugkonzepten. Auch geht der Markteintritt von Brennstoffzellenfahrzeugen zu Lasten von erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepten. FCEV-Fahrzeugkonzepte erreichen zum Jahr 2040 einen Marktanteil in Höhe von 27 %. Der sich ergebende Emissionsspielraum, aufgrund der lokalen Emissionsfreiheit der Brennstoffzellenfahrzeuge, resultiert in einer leichten Steigerung der Marktanteile von ICE-D und MHEV-D-

⁵¹ Die Modellergebnisse werden jährlich für die Jahre 2015 bis 2040 ermittelt und ausgegeben. Zur besseren Veranschaulichung werden diese lediglich für die genannten Eckjahre aufgezeigt und diskutiert.

Fahrzeugkonzepten. Insgesamt zeigt sich, dass dieselkraftstoffbetriebene Fahrzeugkonzepte den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt weiterhin dominieren. Der Marktanteil reduziert sich über die Jahre von 99 % im Jahre 2015 bis auf 67 % im Jahre 2040. Der Marktanteil der erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepte variiert zwischen 1 % im Jahr 2015 und 20 % im Jahr 2035. Mit Markteintritt der brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugkonzepte reduziert sich dieser auf 6 %. BEV-Fahrzeugkonzepte erlangen zum Jahr 2035 einen geringfügigen Marktanteil. Darüber hinaus werden keine weiteren Marktanteile erschlossen, da der Erfahrungskurveneffekt für das Batteriesystem vom Typ Hochenergie zu gering ist, um konkurrenzfähig zu bleiben.

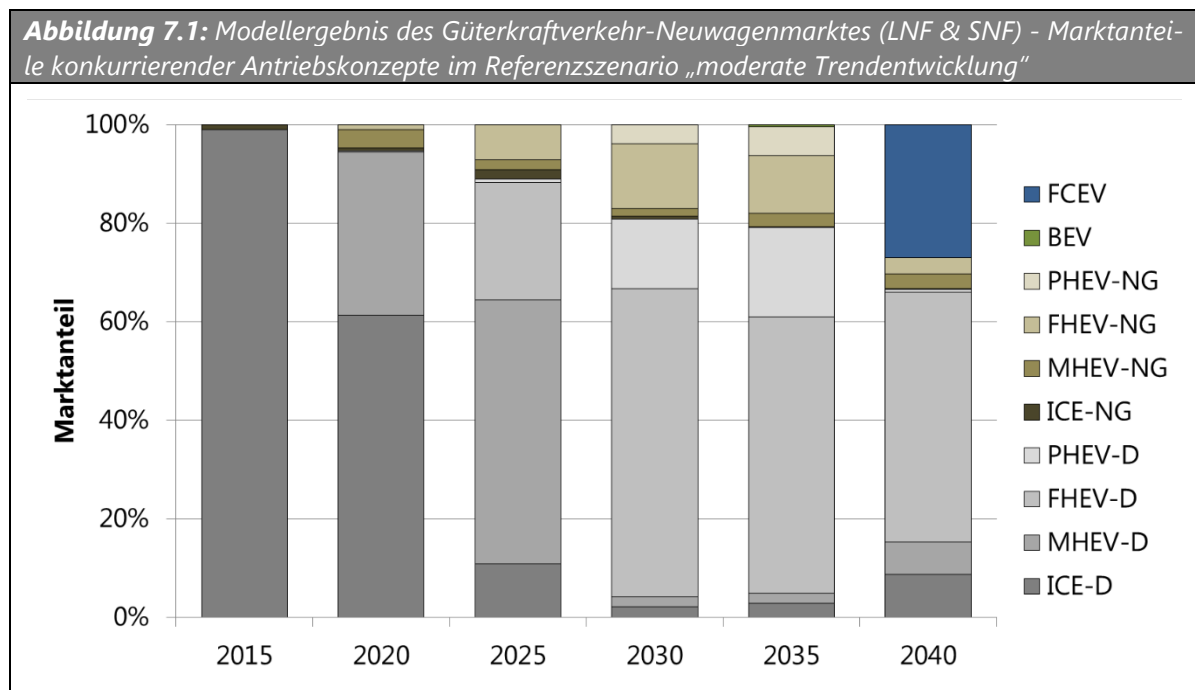
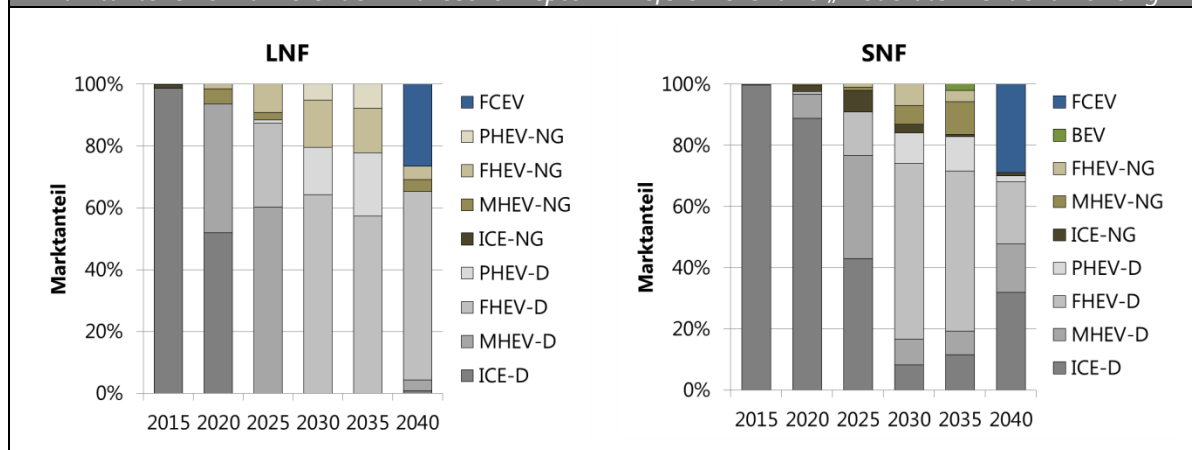


Abbildung 7.2 zeigt die Modellergebnisse des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach den leichten (linke Abbildung) und schweren Nutzfahrzeugen (rechte Abbildung). Hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge erfordert die im Jahr 2020 geltende CO₂-Regulierung einen hohen Marktanteil an MHEV-D-Fahrzeugkonzepten. Die antriebskonzeptbedingten Vorteile der Bremsenergierekuperation kommen hauptsächlich im Rahmen des Gütertransports im Nahbereich zum Tragen. Durch die weitere Verschärfung der CO₂-Regulierung sind zudem FHEV-D erforderlich, die sich

ebenso durch hohe Bremsenergierekuperationspotentiale sowohl hinsichtlich des Gütertransports im Nahbereich als auch im Regionalbereich etablieren. Neben PHEV-D-Fahrzeugkonzepten, die bezüglich des Gütertransports im Regional- und Fernbereich hohe Marktanteile erlangen, erreichen auch PHEV-CNG-Fahrzeugkonzepte wesentliche Marktanteile hinsichtlich des Gütertransports im Fernbereich. Zum Jahr 2035 beträgt der Marktanteil von PHEV-D-Fahrzeugkonzepten 21 %. Für PHEV-CNG-Fahrzeugkonzepte beträgt dieser 8 %. Kostennachteile verursacht durch hohe Instandhaltungskosten und der geringe Restwert von erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepten werden erst bei hohen Jahresfahrleistungen überkompensiert. Die wesentlichen Treiber für PHEV-Fahrzeugkonzepte sind dabei hohe Jahresfahrleistungen unter der Voraussetzung eines ausreichend hohen elektrischen Fahranteils. Zum Jahr 2036 erreichen FCEV-Fahrzeugkonzepte zuerst im Nahbereich, nachfolgend im Regional- und Fernbereich den Markteintritt. Zusätzliche Kosten für die EVSE und ein geringerer Steuervorteil verhindern die Wettbewerbsfähigkeit von BEV-Fahrzeugkonzepten. Darüber hinaus wird in den Folgejahren, aufgrund des signifikanten Erfahrungskurveneffektes des Brennstoffzellensystems in Kombination mit einem vorteilhaften Wasserstoffpreis, deren Wettbewerbsfähigkeit gestärkt. Dies geht mit wesentlichen Marktanteilen im Regionalbereich einher. Der Marktanteil dieselbetriebener Fahrzeugkonzepte reduziert sich über die Jahre von 99 % im Jahre 2015 bis auf 65 % im Jahre 2040. Der Marktanteil der erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepte variiert zwischen 1 % im Jahr 2015 und 22 % im Jahr 2035. Mit Markteintritt der brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugkonzepte reduziert sich dieser auf 8 %.

Abbildung 7.2: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF
- Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“

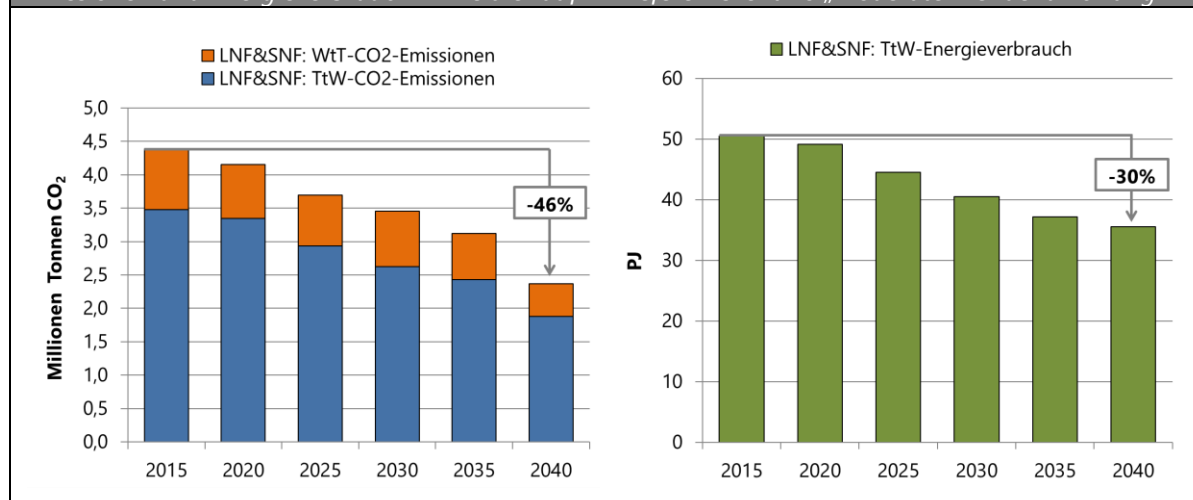


Hinsichtlich der schweren Nutzfahrzeuge erfordert die zugrunde gelegte CO₂-Regulierung ebenso zunehmende Marktanteile elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. So erlangen MHEV-D-Fahrzeugkonzepte überwiegend im Nahbereich und zu Teilen im Regionalbereich, aufgrund der Nutzung des Rekuperationspotentials, segmentübergreifend hohe Marktanteile. Diese variieren zwischen 8 % und 34 %. Mit zunehmender Verschärfung der CO₂-Regulierung erlangen FHEV-D-Fahrzeugkonzepte überwiegend im Nahbereich und zu Teilen im Regionalbereich segmentübergreifend hohe Marktanteile, welche zwischen 1 % und 57 % variieren. Die fortschreitende Verringerung der flottenspezifischen TtW-CO₂-Emissionen erfordert einen höheren Elektrifizierungsgrad. Auch für MHEV- und FHEV-Fahrzeugkonzepte sind nun CO₂-Abgaben zu entrichten, was in einem Markteintritt von PHEV-D-Fahrzeugkonzepten zum Jahr 2028 resultiert. Zum Jahr 2035 erreichen PHEV-Fahrzeugkonzepte den höchsten Marktanteil in Höhe von 11 %. Zum Jahr 2040 reduziert sich dieser aufgrund der geringeren Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu den konkurrierenden FCEV-Fahrzeugkonzepten auf 2 %. Eingesetzt werden die PHEV-Fahrzeugkonzepte hauptsächlich im Nahbereich bezüglich der Fahrzeugsegmente 18t zGG, 26t zGG und 40t zGG. Erdgasbetriebene Fahrzeugkonzepte erlangen überwiegend im Fernbereich in den Fahrzeugsegmenten 18t zGG und 26t zGG hohe Marktanteile. Fahrzeugkonzepte mit Flüssiggasspeicherung (LNG) erlangen Marktanteile im Fernbereich hinsichtlich

der Fahrzeugsegmente 26t zGG und 40t zGG. Diese variieren in Abhängigkeit der Betrachtungsjahre zwischen 2 % und 5 %. Insgesamt variieren die Marktanteile von erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepten zwischen 1 % und 16 %. Die Marktanteile von dieselbetriebenen Fahrzeugkonzepten reduzieren sich von 100 % im Jahr 2015 auf 70 % im Jahr 2040. BEV-Fahrzeugkonzepte erreichen zum Jahr 2035 geringfügige Marktanteile im Nahbereich hinsichtlich des Segmentes 18t zGG und im Regional- sowie Fernbereich bezüglich des Segmentes 12t zGG. Insgesamt beträgt dieser 2 %. Aufgrund eines signifikanteren Erfahrungskurveneffektes der Brennstoffzellentechnologie im Vergleich zur Batterietechnologie, können sich BEV-Fahrzeugkonzepte nicht am Markt behaupten. Dieser wird durch den Markteintritt von FCEV-Fahrzeugkonzepten hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge zum Jahr 2036 ausgelöst und verhilft schweren FCEV-Nutzfahrzeugkonzepten zum Jahr 2037 zur Konkurrenzfähigkeit. Der Einsatz erfolgt im Wesentlichen im Nahbereich bezüglich der Fahrzeugsegmente 7,5t zGG und 18t zGG, im Regionalbereich bezüglich der Fahrzeugsegmente 7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG sowie 26t zGG und im Fernbereich bezüglich der Fahrzeugsegmente 12t zGG, 18t zGG und 26t zGG. Zum Jahr 2040 beträgt der Marktanteil von schweren FCEV-Nutzfahrzeugkonzepten 29 %.

Auf Basis der Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) resultiert zum Jahr 2040 eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen in Höhe von 46 % im Vergleich zum Basisjahr 2015. Die Reduktion des Energieverbrauchs im gleichen Betrachtungszeitraum beträgt 30 % (siehe Abbildung 7.3). Dabei erhöhen sich die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte um 16 % von 50.406 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 58.314 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 16 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 4 % (5 % im Mittel), von 39.259 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 40.940 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 1.066 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf (2015-2040) betragen diese im Mittel 3.260 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

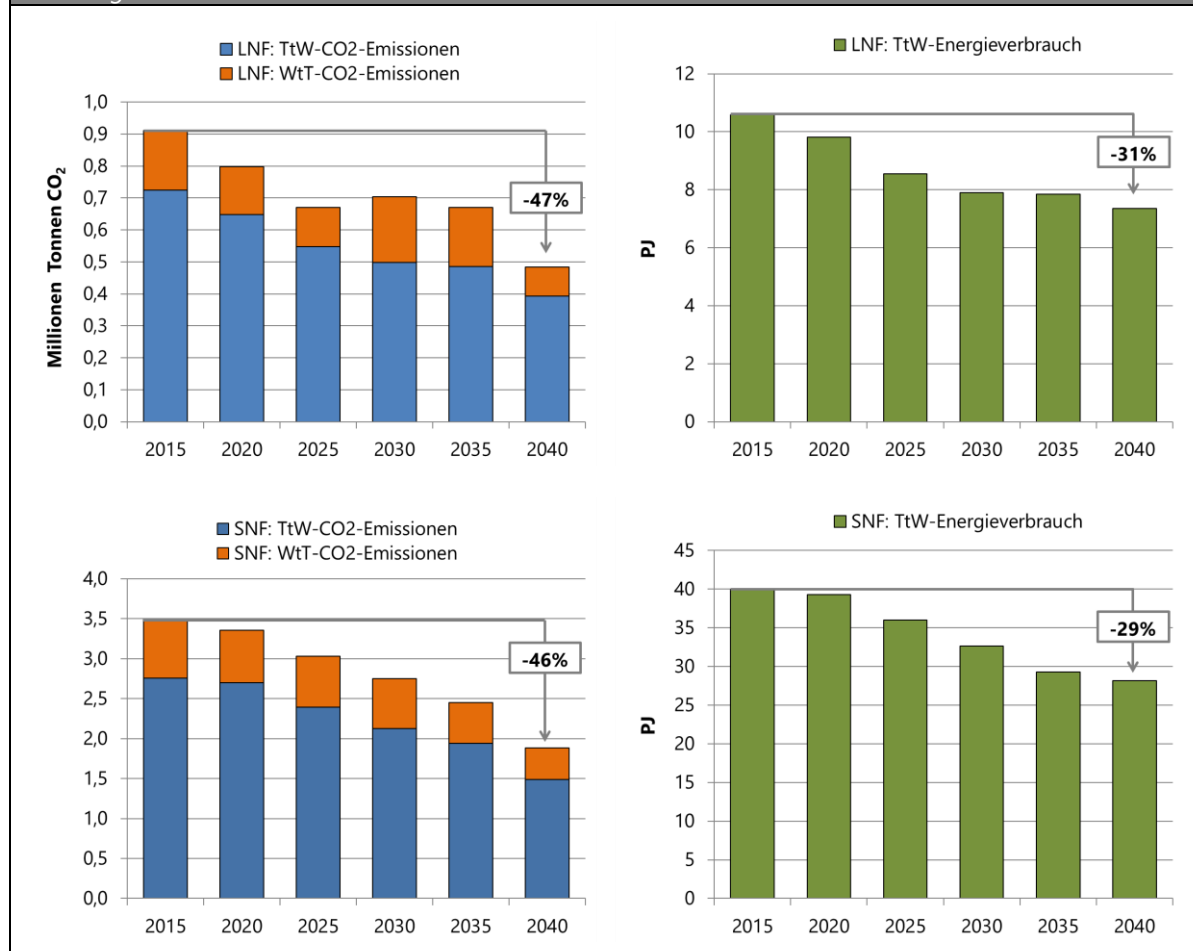
Abbildung 7.3: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“



Hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen um 47 % und eine Reduktion des Energieverbrauchs um 31 % erreicht (siehe Abbildung 7.4). Der steigende Anteil der WtT-CO₂-Emissionen in den Jahren 2030 und 2035 ist hauptsächlich durch den hohen Marktanteil von PHEV-Fahrzeugkonzepten zu erklären. Neben den CO₂-Emissionen zur Herstellung und Verteilung des verwendeten Kraftstoffs sind darüber hinaus die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung zu berücksichtigen. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich um 20 % von 32.080 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 38.340 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 22 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 3 % (4 % im Mittel), von 29.733 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 30.670 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 2.977 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ im Jahr 2040. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 7.324 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen um 46 % und eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 29 % erreicht. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich dabei um 12 % von 104.964 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 117.781 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 12 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 6 % (6 % im Mittel), von 67.619 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 71.515 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaf-

fungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 496 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 1.856 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

Abbildung 7.4: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“



Die segmentspezifischen CO₂-Emissionen der Neuwagenflotten orientieren sich in guter Näherung an den vorgegebenen Zielwerten. Die Mittelwerte der jährlichen Abweichungen je Fahrzeugsegment zu den vorgegebenen Zielwerten über dem betrachteten Simulationszeitraum sind der Tabelle 7.2 zu entnehmen. Ebenso beinhaltet Tabelle 7.3 die prozentuale Reduktion der Flottenemissionen bezüglich der Eckjahre 2030 und 2040 im Vergleich zum Referenzjahr 2015. Die Flottenemissionen der leichten Nutzfahrzeuge reduzieren sich um 40 % zum Jahr 2030 und 49 % zum Jahr 2040.

Die Flottenemissionen der schweren Nutzfahrzeuge reduzieren sich segmentübergreifend um ca. 30 % zum Jahr 2030 und um 42 % zum Jahr 2040.

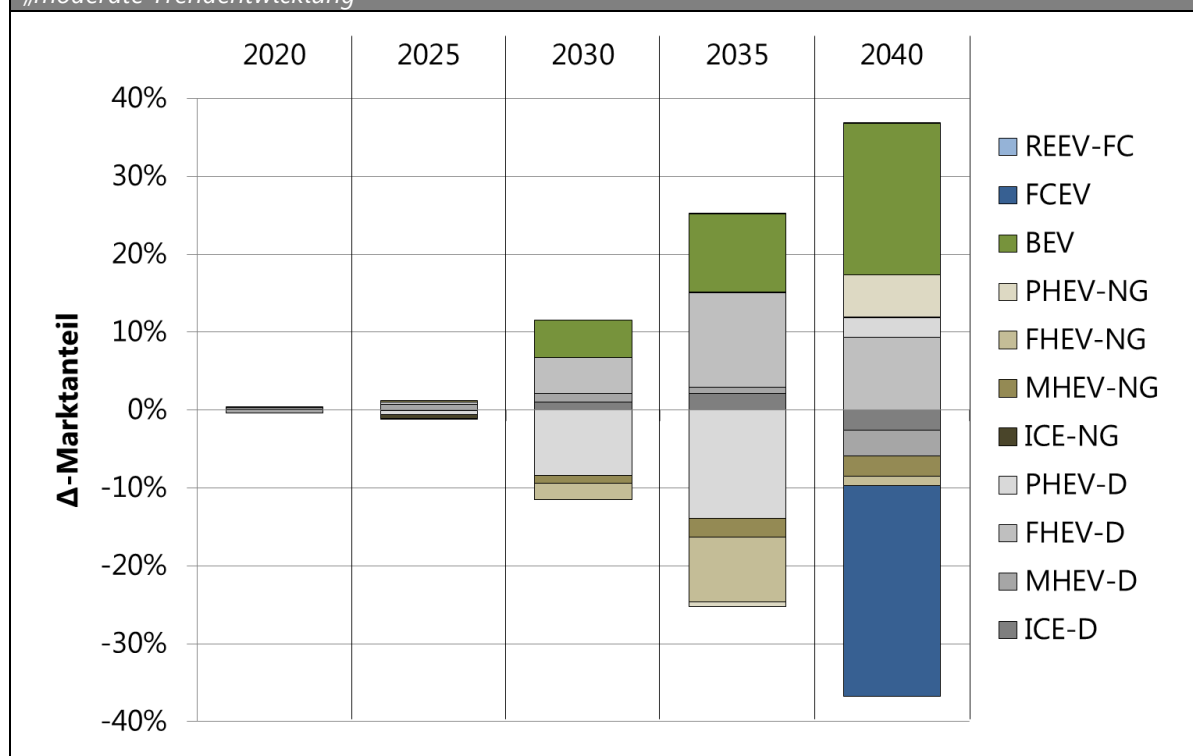
Tabelle 7.2: Reduktion der CO ₂ -Flottenemissionen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten			
Fahrzeugsegment	Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten	Reduktion der CO ₂ -Flottenemissionen	
		2030 zu 2015	2040 zu 2015
3,5t zGG	0 %	40 %	49 %
7,5t zGG	-1 %	30 %	45 %
12t zGG	-1 %	30 %	41 %
18t zGG	-2 %	31 %	43 %
26t zGG	-2 %	31 %	40 %
40t zGG	0 %	30 %	40 %

Einfluss von Synergieeffekten

Zur Untersuchung des Einflusses von Synergieeffekten wird das im Rahmen des Projektes VEU entwickelte und errechnete Pkw-Neuzulassungsszenario „moderate Trendentwicklung“ herangezogen. Auf Basis der jährlichen Neuzulassungszahlen elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte wird die jährlich benötigte Energiemenge in kWh abgeleitet und im Rahmen der lernkurvenbasierten Ermittlung der Batteriekosten berücksichtigt. Der Einfluss von Synergieeffekten hinsichtlich des Brennstoffzellensystems kann dabei nicht untersucht werden, da im Pkw-Neuzulassungsszenario „moderate Trendentwicklung“ kein Markteintritt brennstoffzellenbetriebener Fahrzeugkonzepte erfolgt. Das Ziel ist es, die Auswirkung auf die Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte bei Nutzfahrzeugen im Vergleich zum Referenzszenario aufzuzeigen. Die Modellergebnisse verdeutlichen, dass nennenswerte Änderungen der Marktanteile in den Jahren 2030, 2035 und 2040 resultieren. Durch die Nutzung der Synergieeffekte reduzieren sich die Kosten des Batteriesystemtyps Hochenergie (HE-BAT) in dem Maße, sodass BEV-Fahrzeugkonzepte zum Jahr 2026 bereits den Markteintritt erreichen und bis zum Jahr 2040 kontinuierlich Marktanteile gewinnen können. Der Erfahrungskurveneffekt und damit die Kostenreduktion ist ausreichend hoch genug, um sich gegenüber FCEV-Fahrzeugkonzepten dauerhaft durchsetzen zu können. Wei-

terhin profitieren hauptsächlich FHEV-Fahrzeugkonzepte aufgrund des gewonnenen Emissionsspielraums durch batterieelektrische Antriebskonzepte. Die Nutzung der Synergieeffekte geht insbesondere zu Lasten von PHEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepten. Insgesamt zeigt die Nutzung von Synergieeffekten einen signifikanten Einfluss auf die Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte bei Nutzfahrzeugen (siehe Abbildung 7.5).

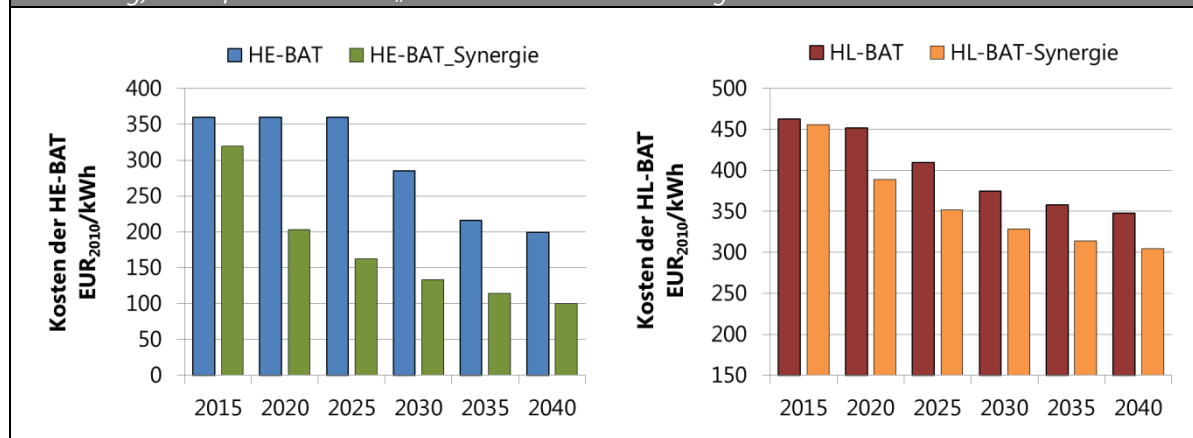
Abbildung 7.5: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Veränderung der Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte durch Synergieeffekte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“



Der Verlauf der Kostenreduktion hinsichtlich der Batteriesystemtypen Hochenergie und Hochleistung veranschaulicht Abbildung 7.6. Im Vergleich zur eher geringen Kostenreduktion des Batteriesystemtyps Hochleistung ermöglicht die Nutzung der Synergieeffekte eine deutliche Reduktion der Kosten des Batteriesystemtyps Hochenergie. Dies ist auf die im Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt bereits benötigte hohe Energiemenge des Batteriesystemtyps Hochleistung zurückzuführen, wohingegen die Energiemengen des Batteriesystemtyps Hochenergie im Vergleich zum Pkw-Markt in einem geringeren Verhältnis zueinander stehen. So ermöglicht die Nutzung der men-

gemäßigen Synergieeffekte im Mittel eine Reduktion der Batteriesystemkosten des Typs Hochenergie um 46 % und um 12 % bezüglich des Typs Hochleistung. Darüber hinaus zeigt sich, dass BEV-Fahrzeugkonzepte unter den gegebenen Rahmenbedingungen ab Batteriesystemkosten des Typs Hochenergie in Höhe von ca. 156 EUR₂₀₁₀/kWh in Nischenbereichen konkurrenzfähig sind.

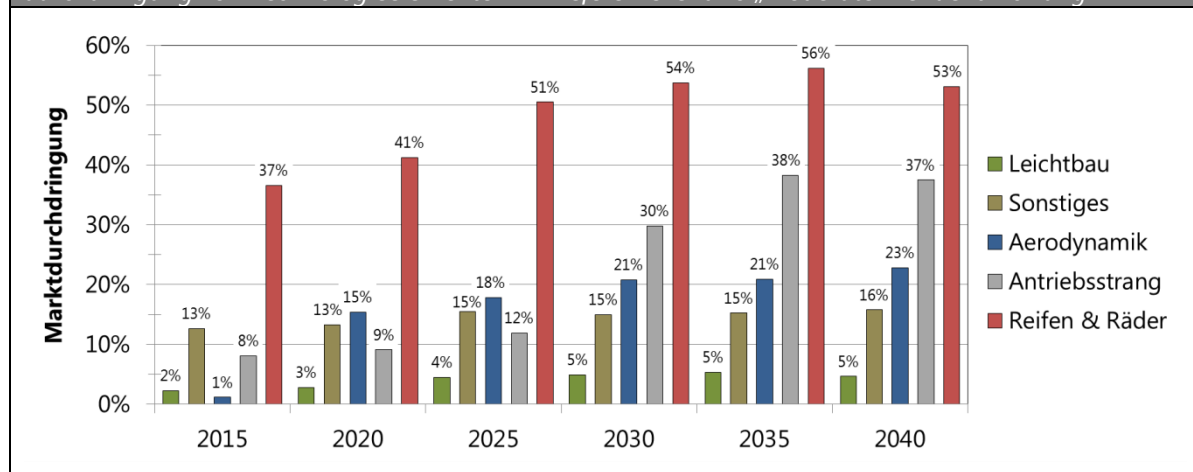
Abbildung 7.6: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) – Kostenreduktionsverläufe der Batteriesystemtypen Hochenergie (linke Abbildung) und Hochleistung (rechte Abbildung) im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“



Marktdurchdringung von Technologieelementen

Aufgrund des hohen Nutzwertes erreichen Technologieelemente der Kategorie „Reifen & Räder“ mit 49 % (Mittelwert) die höchste Marktdurchdringung gefolgt von den Kategorien, „Antriebsstrang“ (22 %), „Aerodynamik“ (16 %), „Sonstiges“ (14 %) und „Leichtbau“ (4 %) (siehe Abbildung 7.7).

Abbildung 7.7: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) – Marktdurchdringung von Technologieelementen im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“

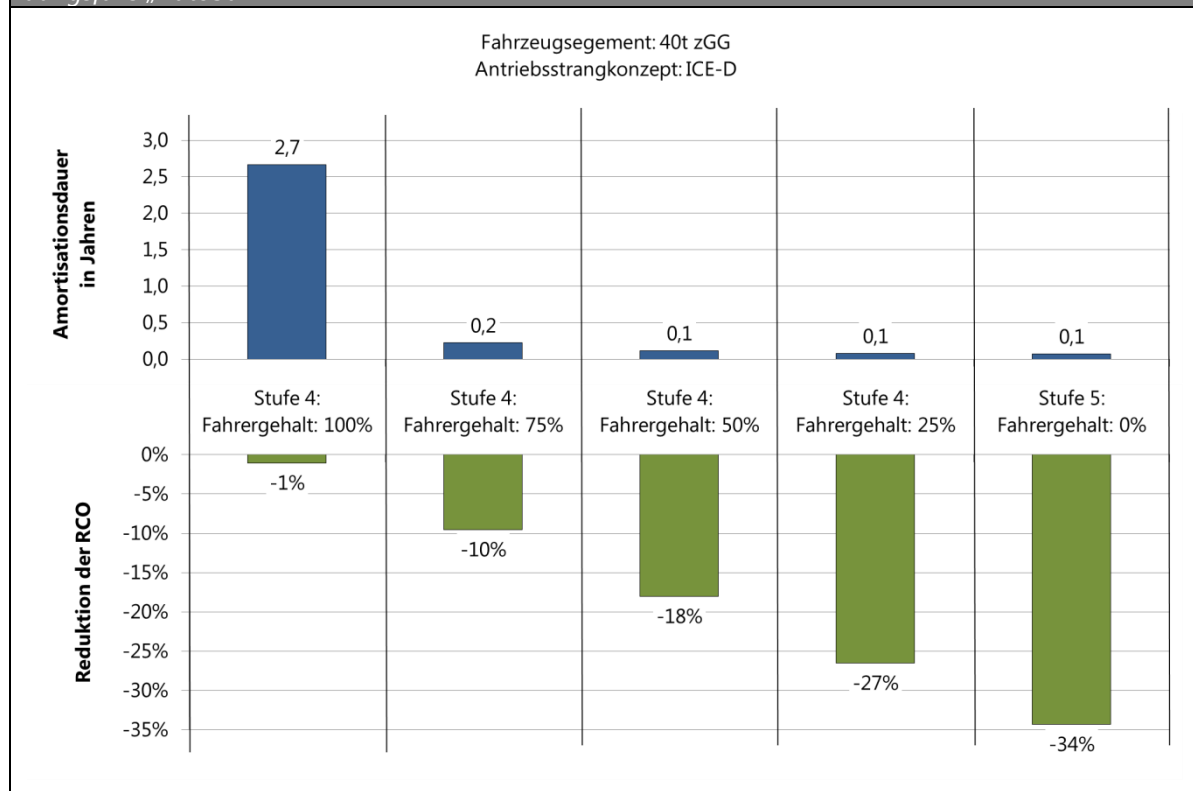


Die Marktdurchdringung von Technologieelementen der Kategorie „Reifen & Räder“ bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge ist dabei mit 34 % (Mittelwert) im Vergleich zu den schweren Nutzfahrzeugen mit 93 % gering. Technologieelemente der Kategorien, „Antriebsstrang“, „Aerodynamik“ und „Leichtbau“, erreichen bzgl. der schweren Nutzfahrzeuge eine Marktdurchdringung in Höhe von 43 % (LNF: 15 %), 8 % (19 %) und 13 % (1 %). Die Kategorie „Sonstiges“ gibt es ausschließlich für die schweren Nutzfahrzeuge. Technologieelemente dieser Kategorie erreichen eine Marktdurchdringung von 57 %. Die überwiegend höhere Marktdurchdringung von Technologieelementen bzgl. der schweren Nutzfahrzeuge ist auf deren höhere Jahresfahrleistungen zurückzuführen. Die im Vergleich geringe Marktdurchdringung von Technologieelementen der Kategorie „Aerodynamik“ ist einerseits darauf zurückzuführen, dass diese ausschließlich bei Transportaufgaben mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten einen ausreichend hohen Nutzwert erzielen. Andererseits existieren insbesondere bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge in Transportaufgaben mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten Technologieelemente anderer Kategorien mit höheren Nutzwerten z.B. aus der Kategorie „Antriebsstrang“. Die ebenfalls geringe Marktdurchdringung von Leichtbautechnologien resultiert aus der geringen Konkurrenzfähigkeit (maßgeblich bedingt durch die hohen Kosten der eingesetzten Werkstoffe) der Technologieelemente, gegenüber Technologieelementen anderer Kategorien.

Hinsichtlich des autonomen Fahrens erreicht ausschließlich das Technologieelement „Autonomiestufe#1“ (Fahrassistenz; Fahrer ist voll beschäftigt) den Markteintritt mit einer Marktdurchdringung in Höhe von 25 % (Mittelwert). Die der Modellierung zugrunde liegende Vorgehensweise zur Auswahl einzelner Technologieelemente aus dem vorgegebenen Portfolio berücksichtigt lediglich die Kostenreduktion auf Basis einer Kraftstoffverbrauchsreduktion. Eine weitere mit einem Technologieelement verbundene Kostenreduktion, z.B. aufgrund eingeschränkter oder nicht erforderlicher Fahraktivitäten des Kraftfahrzeugführers, ist nicht berücksichtigt. Dieser Umstand ist für eine akkurate Bewertung der Technologieelemente „Autonomiestufen#4“ (hohe Automation; keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus) und „Autonomiestufe#5“ (volle Automation; keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich) allerdings notwendig. Um Kostenreduktionspotentiale der Autonomiestufen 4 und 5 aufzuzeigen, werden daher separate RCO-Analysen⁵² durchgeführt und mit einem Referenzfahrzeug verglichen. Im Fokus der RCO-Analysen stehen das Fahrzeugsegment mit dem höchsten Neuzulassungsanteil hinsichtlich der schweren Nutzfahrzeuge (40t zGG) und das Antriebskonzept, welches im Rahmen der Szenarioanalysen den höchsten Marktanteil erzielte (ICE-D). Ebenso wird hierfür ausschließlich der Anwendungsfall „Autobahn“ betrachtet, da dieser aufgrund der geringsten Umgebungskomplexität als erstes Anwendungsfeld angesehen wird. Die ermittelten Kostenreduktionspotentiale bezüglich der Autonomiestufe 4 variieren in Abhängigkeit des Fahreranteils zwischen 1 % und 27 % (siehe Abbildung 7.8). Das ermittelte Kostenreduktionspotential der Autonomiestufe 5 beträgt 34 %. Eine signifikante Kostenreduktion wird dabei erst mit zunehmender Reduktion des Fahreranteils erreicht. Sobald der Fahreranteil reduziert wird, amortisieren sich die Zusatzkosten in nur wenigen Monaten.

⁵² Mögliche Einsparpotentiale hinsichtlich der Versicherungskosten bleiben unberücksichtigt.

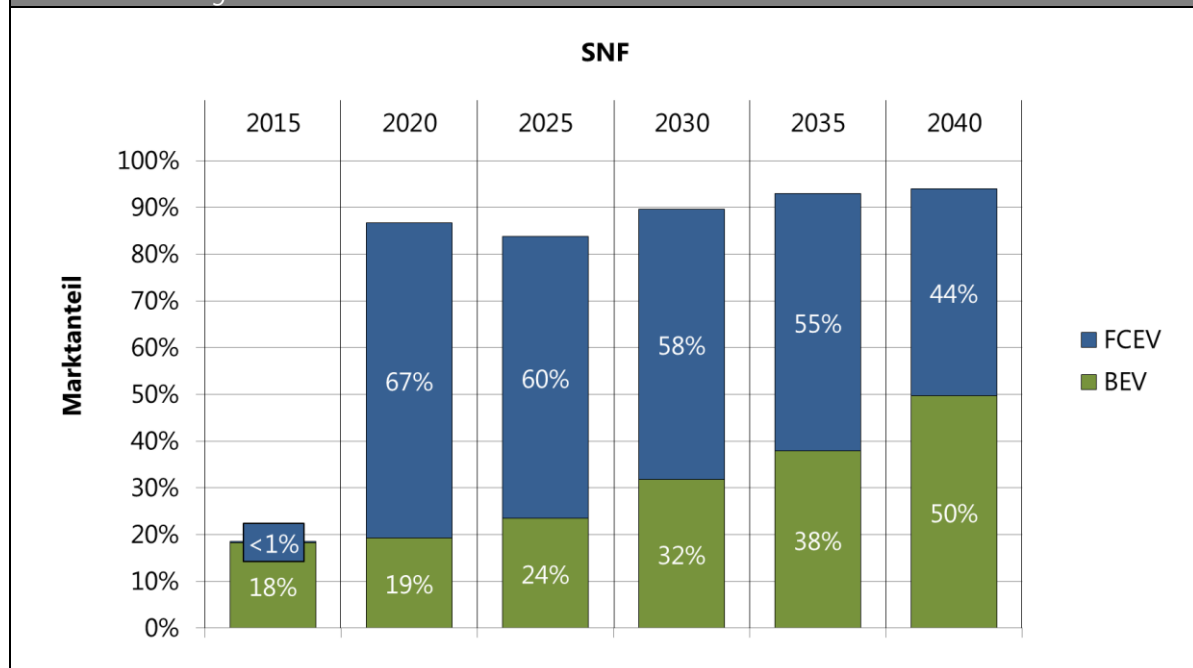
Abbildung 7.8: Kostenreduktionspotentiale der Autonomiestufen 4 und 5 hinsichtlich des Anwendungsfalls „Autobahn“



Weiterhin wird der Einfluss der vollen Automation (Autonomiestufe 5) auf die Marktdurchdringung von batterieelektrischen und brennstoffzellenelektrischen schweren Nutzfahrzeugen dahingehend untersucht, ob aufgrund der Fahrerkostenersparnis ein früherer Markteintritt realisiert werden kann und ob dadurch höhere Marktanteile erreicht werden können. Um das Marktpotential aufzuzeigen wird angenommen, dass die volle Automation ab dem Jahr 2015 zur Verfügung steht. Die antriebsstrangspezifischen Energieeinsparungen der BEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepte entwickeln sich entsprechend der vorgegebenen Technologieportfolios (siehe Anhang F, Tabellen F.1 bis F.18). Unter den gegebenen Rahmenbedingungen im Referenzszenario „*moderate Trendentwicklung*“ (siehe Tabelle 7.1) und der gegebenen Fahrzeugparametrisierung (siehe Anhang H, Tabellen H.1 bis H.6) zeigt sich, dass autonome batterie- und brennstoffzellenelektrische Fahrzeugkonzepte insgesamt hohe Marktanteile (bis zu 94 %) erreichen können. Weiterhin ermöglicht es die volle Automation, den Markteintritt batterie- und brennstoffzellenelektrischer Fahrzeugkonzepte früher herbeizufüh-

ren und diesen zu beschleunigen. Zurückzuführen ist dies im Wesentlichen auf den positiven Lernkurveneinfluss bzgl. der Batterie- und Brennstoffzellentechnologie. Autonome BEV-Fahrzeugkonzepte gewinnen zunehmend an Marktanteilen. Diese variieren zwischen 18 % zum Jahr 2015 und 50 % zum Jahr 2040. Vielversprechende Anwendungsfelder sind der Gütertransport im Nahbereich von Fahrzeugen der Segmente 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG und 40t zGG sowie der Gütertransport im Regionalbereich hinsichtlich des Segmentes 40t zGG. Darüber hinaus kommen autonome BEV-Fahrzeugkonzepte auch im Fernbereich bezüglich des Segmentes 18t zGG zum Einsatz. Aufgrund des hohen Wasserstoffpreises und der hohen Kosten des Brennstoffzellensystems ist der Marktanteil autonomer FCEV-Fahrzeugkonzepte zum Jahr 2015 auf <1 % limitiert. Mit zunehmendem segment- und transportaufgabenübergreifendem Einsatz sowie einem damit einhergehenden signifikantem Erfahrungskurveneffekt und darüber hinaus einer vorteilhaften Wasserstoffpreisentwicklung, erreichen autonome FCEV-Fahrzeugkonzepte zum Jahr 2020 bereits ihren maximalen Marktanteil in Höhe von 67 %. Zum Jahr 2025 zeigt sich die Wirkung des Erfahrungskurveneffektes der Batterietechnologie, sodass sich aufgrund der steigenden Konkurrenzfähigkeit autonomer BEV-Fahrzeugkonzepte der Marktanteil autonomer FCEV-Fahrzeugkonzepte bis zum Jahr 2040 auf 44 % reduziert (siehe Abbildung 7.9). Abschließend ist anzumerken, dass sich durch eine volle Automation (Stufe 5) Freiheitsgrade bei der Gesamtfahrzeugkonzeptentwicklung ergeben, die gänzlich neue Gesamtfahrzeugkonzepte ermöglichen. Dieser Umstand blieb bei den durchgeführten Analysen unberücksichtigt.

Abbildung 7.9: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (SNF) - Marktanteile autonomer batterie- und brennstoffzellenelektrischer Fahrzeugkonzepte im Referenzszenario „moderate Trendentwicklung“



7.2 Alternativszenario „geregelter Ruck“

7.2.1 Szenariobeschreibung

Charakteristisch für das Alternativszenario „geregelter Ruck“ sind umfassende politische Maßnahmen und moderate Impulse ausgehend von den Nachfragern sowie bezüglich der Technologieentwicklung zur Erreichung einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes. Abweichend zum Referenzszenario ist damit eine sukzessive Erhöhung der Energiesteuern auf fossile Kraftstoffe verbunden. Darüber hinaus wurde die Bevorteilung von Dieselmotoren ab dem Jahr 2025 aufgehoben. Für den Dieselmotor ergibt sich somit eine durchschnittliche reale Preissteigerung von 4,8 % pro Jahr. Steuersätze für Erdgas entsprechen dem Regelsteuersatz. Eine Steuerbegünstigung von Erdgas bleibt damit unberücksichtigt. Der Strompreis wird im Mittel, aufgrund einer sich verringenden Umlage für erneuerbare Energien, um 23 % reduziert. Im Vergleich zum Referenzszenario werden die Flottenzielwerte weiter verschärft. So sind die Flottenemissionen zum Jahr 2025 um 20 %, zum Jahr 2030 um 40 % und zum Jahr 2040 um 80 % zu reduzieren.

Die Bezugsjahre zur Ermittlung der zu erreichenden Flottenemissionen sind für die leichten Nutzfahrzeuge das Jahr 2021 und für die schweren Nutzfahrzeuge das Jahr 2019. Die Nutzung der Synergieeffekte hinsichtlich der Batterie- und Brennstoffzellentechnologie, ausgehend von dem Markt für Personenkraftwagen, beschleunigen die Kostenreduktion der jeweiligen Systeme. Damit einhergehend werden veränderte Lernraten hinsichtlich der Batterietechnologie aufgrund einer Optimierung der Verfahrenstechnik und einer fortschreitenden Automatisierung sowie Rationalisierung antizipiert. Bezüglich der Brennstoffzellentechnologie ist die maximale Lernrate bereits erreicht, weshalb keine Änderung dieser erfolgt. Auf Seiten der Nachfrager werden höhere Amortisationsdauern akzeptiert. Je Kundentyp wird diese um ein Jahr erweitert. Die Zusammenfassung der im Vergleich zum Referenzszenario veränderten Annahmen bezüglich des Alternativszenarios „*geregelter Ruck*“ ist der Tabelle 7.3 zu entnehmen.

Tabelle 7.3: Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Alternativszenario „geregelter Ruck“

	Parameter	Einheit	2015	2020	2025	2030	2035	2040	Anmerkungen
Energiepreise (ohne MWSt)	Dieselpreis	EUR/l	0,91	1,27	1,84	1,89	1,95	2,00	Erhöhung der Energiesteuern & keine Bevorteilung von Dieselmotoren
	CNG-Preis	EUR/kg	0,97	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	keine Steuerbegünstigung
	LNG-Preis	EUR/kg	1,06	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	keine Steuerbegünstigung
	Strompreis	EUR/kWh	0,16	0,17	0,18	0,19	0,18	0,17	Reduktion im Mittel um 23%
CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Flottenzielwerte LNF								Verschärfung der Minderungsziele
	3,5t zGG	g/km	-	169	136	102	68	35	
	CO ₂ -Flottenzielwerte SNF								Verschärfung der Minderungsziele
	7,5t zGG	g/km	-	264	218	164	109	55	
	12t zGG	g/km	-	393	325	244	164	81	
	18t zGG	g/km	-	369	306	229	154	76	
	26t zGG	g/km	-	658	545	409	274	136	
40t zGG	g/km	-	727	602	451	301	150		
sonstige Modellannahmen	Synergieeffekte Pkw-Markt	-	ja					Nutzung der Energiemengen in kWh je Batterietyp & veränderte Lernraten (BAT HE: 0,82; BAT HL: 0,93); Nutzung der produzierten kWh an Brennstoffzellensystemleistung & keine veränderte Lernrate	
Kundentyp	geforderte Amortisationsdauer								je Kundentyp + 1 Jahr
	Innovator	Jahre	Fzg.-Haltedauer						
	aufgeschlossener Anwender	Jahre	5						
	konservativer Anwender	Jahre	3						
	Zweifler	Jahre	2						

7.2.2 Szenarioergebnisse

Das Modellergebnis für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt (LNF & SNF) zeigt, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen signifikante Marktanteile für lokal emissionsfreie Antriebstechnologien erreicht werden können und verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeugkonzepte die Marktdominanz zum Jahr 2030 verlieren.

BEV-Fahrzeugkonzepte sind bereits ab dem Jahr 2018 in Nischenbereichen konkurrenzfähig und steigern ihren Marktanteil in Höhe von 7 % zum Jahr 2020 auf 24 % bis zum Jahr 2040. BEV-Fahrzeugkonzepte profitieren dabei im Wesentlichen aufgrund des beschleunigten Erfahrungskurveneffektes und der Reduktion des Strompreises. FCEV-Fahrzeugkonzepte erreichen erst zum Jahr 2027 die Konkurrenzfähigkeit. Aufgrund des signifikanten Erfahrungskurveneffektes erreichen diese zum Jahr 2030 bereits einen Marktanteil in Höhe von 22 %, welcher bis zum Jahr 2040 auf 55 % gesteigert werden kann. Darüber hinaus bewirkt die zunehmende Verschärfung der Zielwerte eine deutliche Steigerung der CO₂-Abgaben für konventionelle Fahrzeugkonzepte, was die Wettbewerbsfähigkeit hybridelektrischer Fahrzeugkonzepte und im Besonderen von MHEV-D- sowie FHEV-D-Fahrzeugkonzepten bestärkt. Ab einem gewissen Anspannungsgrad sind jedoch auch für hybridelektrische Fahrzeugkonzepte CO₂-Abgaben zu entrichten was wiederum die Konkurrenzfähigkeit lokal emissionsfreier Fahrzeugkonzepte fördert (siehe Abbildung 7.10).

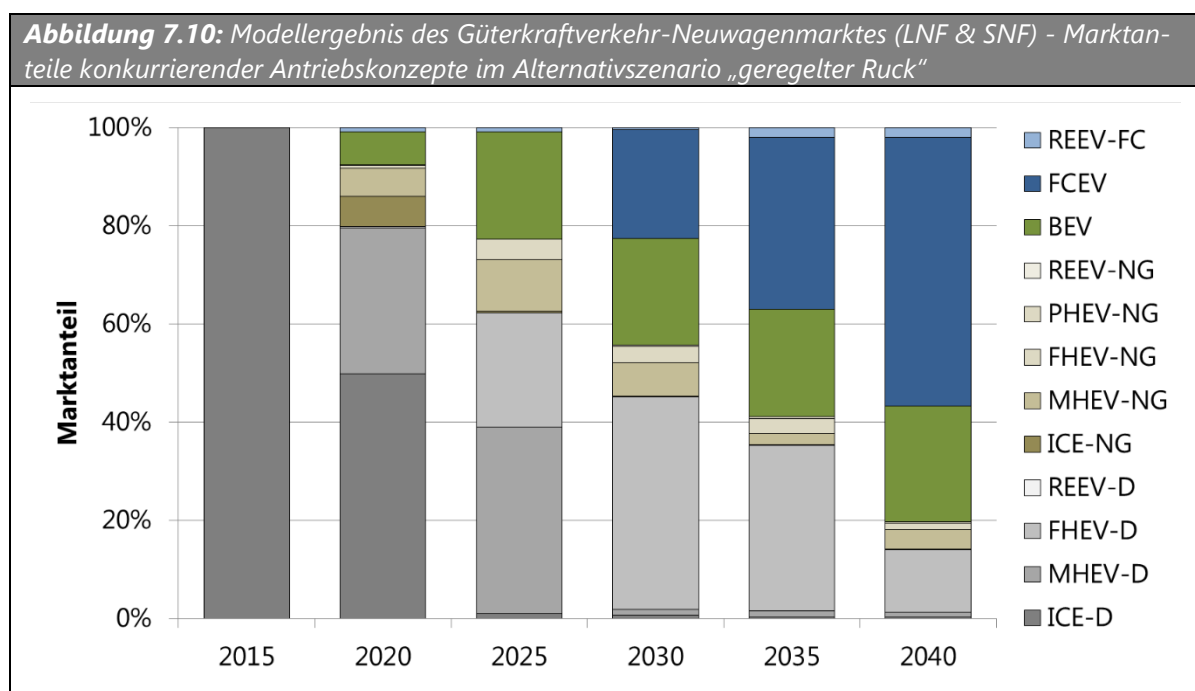
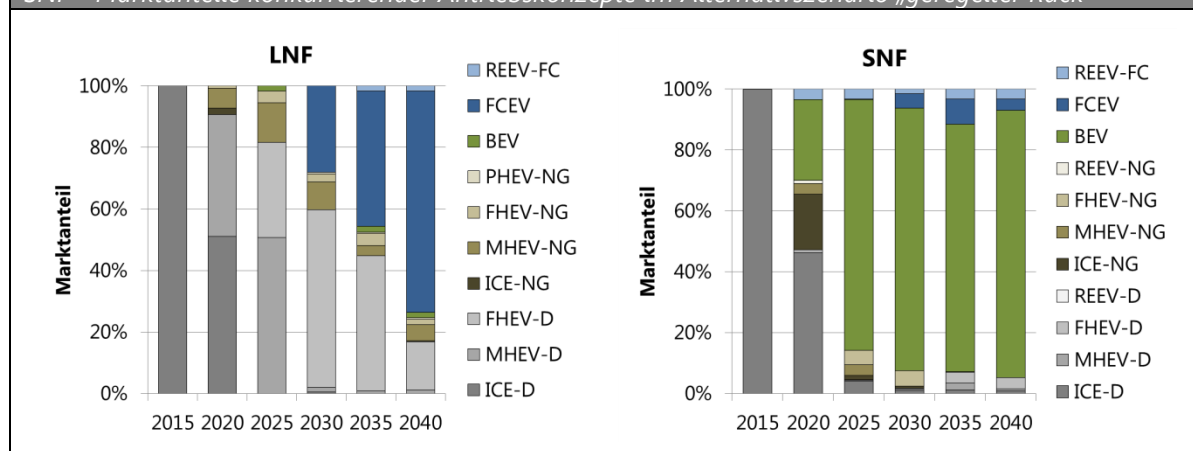


Abbildung 7.11 zeigt die Modellergebnisse des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes, separiert nach den leichten (linke Abbildung) und schweren Nutzfahrzeugen (rechte

Abbildung). Bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge zeigt sich, dass FCEV-Fahrzeugkonzepte unter den gegebenen Rahmenbedingungen zum Jahr 2030 signifikante Marktanteile erreichen und bis zum Jahr 2040 weitere erschließen. BEV-Fahrzeugkonzepte können sich gegenüber FCEV-Fahrzeugkonzepten nicht am Markt behaupten. Überwiegend sind die jährlichen Laufleistungen sowie die Anschaffungskostendifferenz im Vergleich zu FCEV-Fahrzeugkonzepten nicht ausreichend hoch genug, um die Zusatzkosten der benötigten EVSE und den niedrigeren Steuervorteil auszugleichen bzw. zu überkompensieren. FCEV-Fahrzeugkonzepte profitieren von einem signifikanteren Erfahrungskurveneffekt und höheren Steuervorteilen. Die wesentlichen Marktanteile von FCEV-Fahrzeugkonzepten werden im Nah- und Regionalbereich erschlossen. Die geringen Marktanteile hinsichtlich BEV- und REEV-FC-Fahrzeugkonzepten ergeben sich ausschließlich in vereinzelten Nischen des Fernbereichs.

Abbildung 7.11: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „geregelter Ruck“

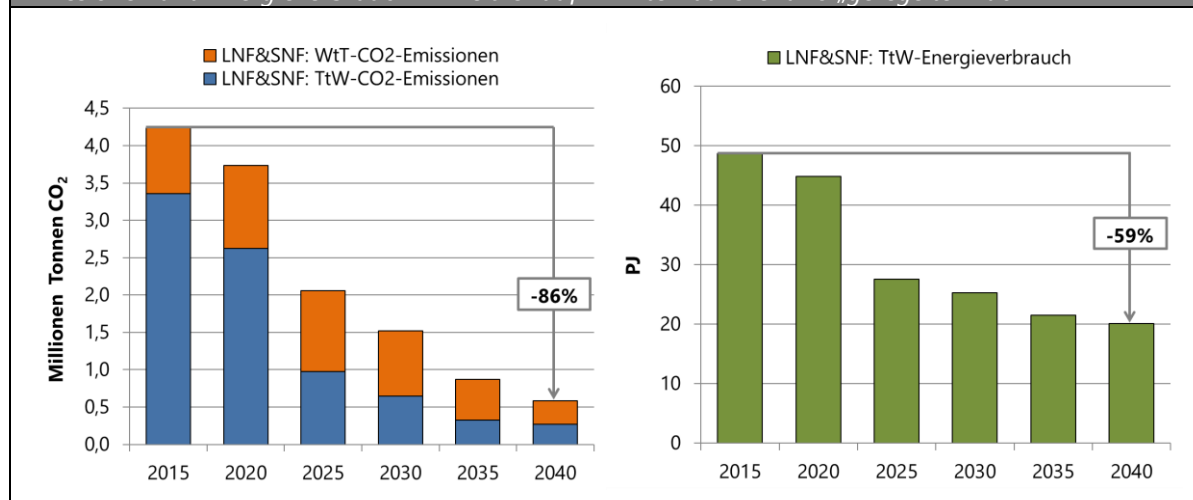


Im Gegensatz zu den leichten Nutzfahrzeugen zeigt sich bei den schweren Nutzfahrzeugen, dass batterieelektrische Fahrzeugkonzepte ihre Wettbewerbsfähigkeit behaupten können. Ausschlaggebend hierfür sind höhere Jahresfahrleistungen. Segmentübergreifend ist das Marktpotential von BEV-Fahrzeugkonzepten mit einer Reichweite von 150 km bedeutend, sowohl den Gütertransport im Nahbereich als auch den Gütertransport im Regionalbereich betreffend. Der Markteintritt findet im

Rahmen der Segmente 18t zGG und 26t zGG statt. Bezüglich des Segmentes 12t zGG erlangen BEV-Fahrzeugkonzepte mit einer Reichweite von 150 km zudem hohe Marktanteile im Fernbereich. Dies trifft ebenso für das Segment 40t zGG und BEV-Fahrzeugkonzepten mit einer Reichweite von 300 km zu. Die Gründe sind je Fahrzeugsegment und Transportaufgabe verschieden. Insgesamt betrachtet und gegenüber FCEV-Fahrzeugkonzepten wird die Wettbewerbsfähigkeit der BEV-Fahrzeugkonzepte durch einen höheren Restwert gefestigt. Zudem profitieren die BEV-Fahrzeugkonzepte durch geringere laufende Kosten und durch teilweise deutlich geringere Investitionskosten, sodass der geringere Steuervorteil sowie die Mehrkosten der Ladeinfrastruktureinheit überkompensiert werden können. Aufgrund der Reichweitenlimitierung von BEV-Fahrzeugkonzepten mit einer Reichweite von 150 km und den Kostennachteilen von BEV-Fahrzeugkonzepten mit einer Reichweite von 300 km können sich FCEV-Fahrzeugkonzepte hinsichtlich der Fahrzeugsegmente 18t zGG und 26t zGG bezüglich der Gütertransporte im Regional- und Fernbereich einzeln durchsetzen. Dies trifft ebenso für das Segment 40t zGG im Fernbereich zu. REEV-FC-Fahrzeugkonzepte behaupten sich in Nischen bezüglich der Segmente 18t zGG, 26t zGG und 40t zGG im Regionalbereich und zudem hinsichtlich des Segments 18t zGG im Fernbereich.

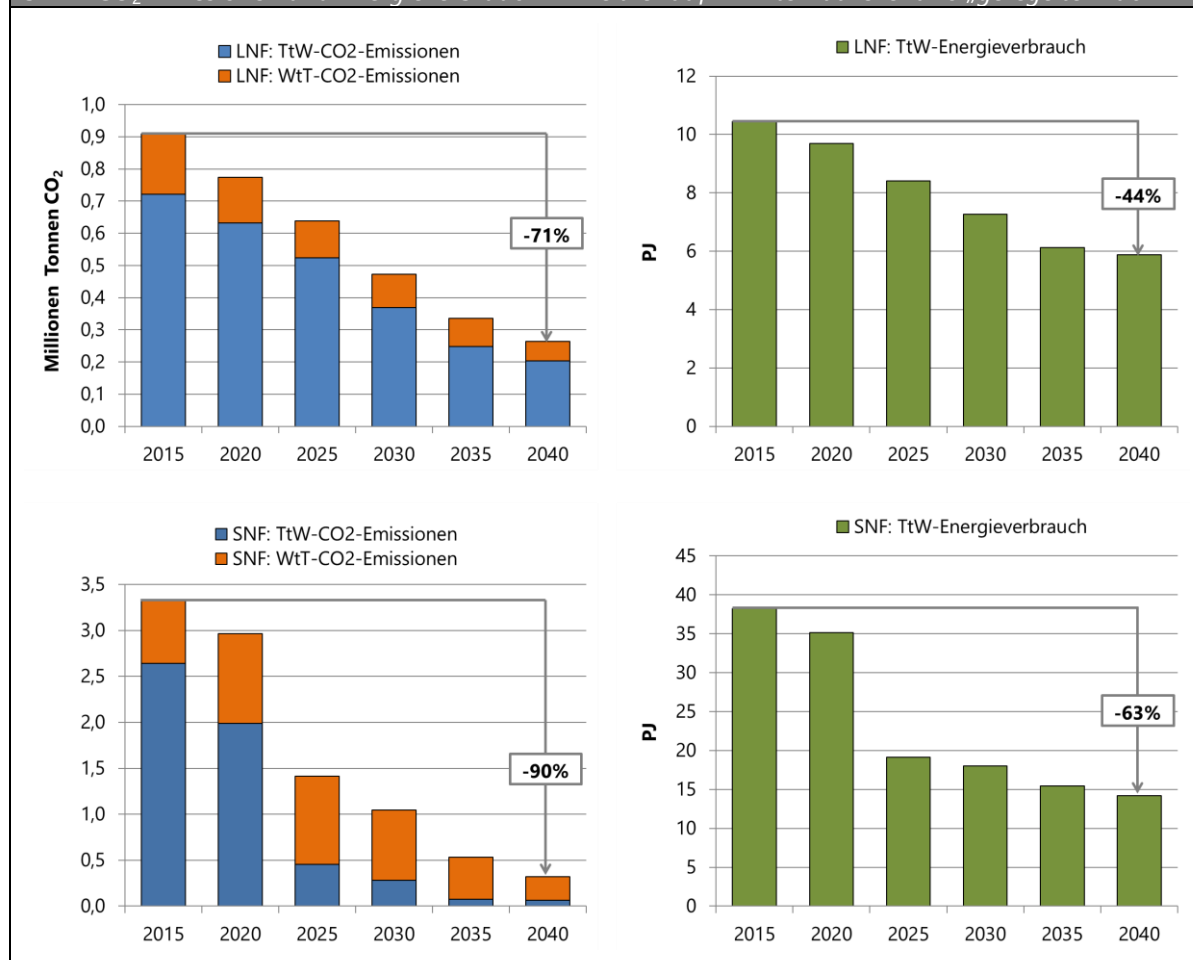
Die zum Jahr 2040 resultierende Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2015 beträgt, den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) betreffend, 86 %. Die Reduktion des Energieverbrauchs im gleichen Betrachtungszeitraum beträgt 59 % (siehe Abbildung 7.12). Dabei erhöhen sich die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte um 16 % von 50.721 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 58.628 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 13 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 4 % (4 % im Mittel), von 39.166 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 40.653 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 588 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf (2015-2040) betragen diese im Mittel 1.314 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

Abbildung 7.12: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „geregelter Ruck“



Die WtW-CO₂-Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge werden um 71 % reduziert und eine Reduktion des Energieverbrauchs in Höhe von 44 % erreicht. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich um 13 % von 32.094 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 36.313 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 13 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 5 % (3 % im Mittel), von 29.728 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 31.066 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 1.328 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ im Jahr 2040. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 2.817 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen um 90 % und eine Reduktion des Energieverbrauchs um 63 % erreicht. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich dabei um 18 % von 106.176 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 125.061 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 12 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 3 % (5 % im Mittel), von 67.264 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 69.194 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 329 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 556 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

Abbildung 7.13: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „geregelter Rück“



Aufgrund der segmentübergreifend absoluten Wettbewerbsfähigkeit und der damit verbundenen signifikanten Marktdiffusion von BEV-Fahrzeugkonzepten hinsichtlich der schweren Nutzfahrzeuge werden die segmentspezifischen Flottenemissionen erheblich reduziert und die Flottenzielwerte deutlich unterschritten. Der beschleunigte Erfahrungskurveneffekt in Kombination mit einer Verringerung des Strompreises und den ambitionierten CO₂-Zielwerten sind dabei so bedeutend, dass sich bereits zum Jahr 2030 segmentspezifische Reduktionspotentiale in Höhe von 90 % und 98 % ergeben. In einzelnen Segmenten erfolgt zum Jahr 2040 sogar eine Reduktion der Flottenemissionen um 100 %. Die Flottenemissionen des Fahrzeugsegmentes 3,5t zGG orientieren sich in guter Näherung an den vorgegebenen Zielwerten und resultieren in einer Reduktion um 52 % zum Jahr 2030 und um 83 % zum Jahr 2040. Der Mittel-

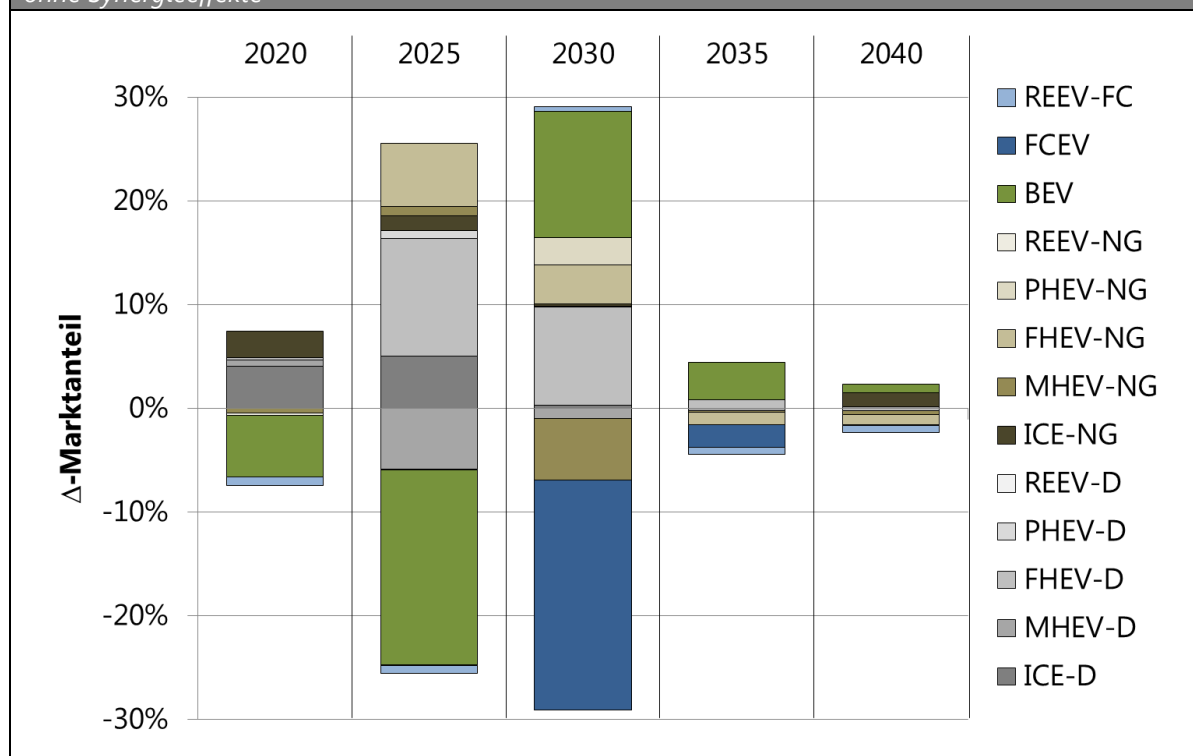
wert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten sowie die Reduktion der CO₂-Flottenemissionen bezüglich der Eckjahre 2030 und 2040 im Vergleich zum Referenzjahr 2015 sind der Tabelle 7.4 zu entnehmen

Tabelle 7.4: Reduktion der CO ₂ -Flottenemissionen im Alternativszenario „geregelter Ruck“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten			
Fahrzeug-segment	Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten	Reduktion der CO ₂ -Flottenemissionen	
		2030 zu 2015	2040 zu 2015
3,5t zGG	-2 %	52 %	83 %
7,5t zGG	-67 %	98 %	98 %
12t zGG	-71 %	98 %	97 %
18t zGG	-75 %	98 %	100 %
26t zGG	-77 %	98 %	100 %
40t zGG	-52 %	90 %	91 %

Einfluss von Synergieeffekten

Die Nutzung der Synergieeffekte ausgehend aus dem Pkw-Neuzulassungsszenario „geregelter Ruck“ verhelfend den BEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepten zu einem früheren Markteintritt und einer beschleunigten Marktdiffusion. Insbesondere profitieren dabei FCEV-Fahrzeugkonzepte deren Markteintritt bereits zum Jahr 2025 erfolgt anstatt zum Jahr 2031. Hinsichtlich der BEV-Fahrzeugkonzepte erfolgt der Markteintritt ein Jahr früher, 2018 anstelle von 2019. Weiterhin wird dadurch die Wettbewerbsfähigkeit der FCEV-Fahrzeugkonzepte gefestigt, vor allem bei den leichten Nutzfahrzeugen. Ohne die Berücksichtigung von Synergieeffekten erlangen BEV-Fahrzeugkonzepte hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge deutlich höhere Marktanteile, insbesondere zum Jahr 2030. Auch im Rahmen des Alternativszenarios „geregelter Ruck“ zeigt die Nutzung der Synergieeffekte ausgehend aus dem Pkw-Markt einen signifikanten Einfluss auf die Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte. Im Vergleich zum Referenzszenario findet dieser zu einem früheren Zeitpunkt statt (siehe Abbildung 7.14).

Abbildung 7.14: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Veränderung der Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „geregelter Ruck“ – ohne Synergieeffekte



7.3 Alternativszenario „freies Spiel“

7.3.1 Szenariobeschreibung

Das Alternativszenario „*freies Spiel*“ ist dadurch gekennzeichnet, dass keine Impulse aus der Regierung, von den Nachfragern oder hinsichtlich der Technologieentwicklung, zur Förderung einer Reduktion der CO₂-Emissionen des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes erfolgen. Abweichend zum Referenzszenario erfolgt keine Verschärfung des zum Jahr 2020 geltenden Flottenzielwertes für leichte Nutzfahrzeuge. Hinsichtlich der schweren Nutzfahrzeuge erfolgen keine Vorgaben zur Einhaltung spezifischer Flottenemissionen. Auch wird die Förderung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Elektromobilität eingeschränkt, was in der Folge die Entwicklung innovativer Technologien entschleunigt. Die Zusammenfassung der im Vergleich zum Referenzszenario veränderten Annahmen bezüglich des Alternativszenarios „*freies Spiel*“ ist Tabelle 7.5 zu entnehmen.

Tabelle 7.5: Zusammenfassung wesentlicher Annahmen im Alternativszenario „freies Spiel“

	Parameter	Einheit	2015	2020	2025	2030	2035	2040	Amerkungen
CO ₂ -Emissionen	CO ₂ -Flottenzielwerte LNF								
	3,5t zGG	g/km	-	169	169	169	169	169	keine Verschärfung über das Jahr 2020 hinaus
	CO ₂ -Flottenzielwerte SNF								
	7,5t zGG	g/km	-	-	-	-	-	-	keine Zielwertvorgaben
	12t zGG	g/km	-	-	-	-	-	-	
	18t zGG	g/km	-	-	-	-	-	-	
	26t zGG	g/km	-	-	-	-	-	-	
	40t zGG	g/km	-	-	-	-	-	-	
sonstige Modellannahmen	Technologieportfolios	-	keine Berücksichtigung der Technologieelemente: PHEV#1, PHEV#2, BEV/REEV#1, BEV/REEV#2, FCEV#1 und FCEV#2						

7.3.2 Szenarioergebnisse

Das Modellergebnis für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt (LNF & SNF) verdeutlicht, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen das Antriebsportfolio ausschließlich aus verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugkonzepten besteht. Der Marktanteil der mit Diesel als Kraftstoff betriebener Fahrzeugkonzepte variiert zwischen 92 % und 99 %. Somit variiert der Marktanteil von erdgasbetriebenen Fahrzeugkonzepten zwischen 1 % und 8 %. Aufgrund keiner bzw. keiner weiteren Verschärfung von CO₂-Flottenzielwerten erfolgt keine ausreichende Stärkung der Konkurrenzfähigkeit von FHEV-, PHEV-, BEV- REEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepten. Eine wesentliche Rolle zur Erreichung gegebener Flottenzielwerte übernehmen MHEV-Fahrzeugkonzepte, mit variierendem Marktanteil zwischen 35 % zum Jahr 2020 und 39 % zum Jahr 2040.

Abbildung 7.15: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „freies Spiel“

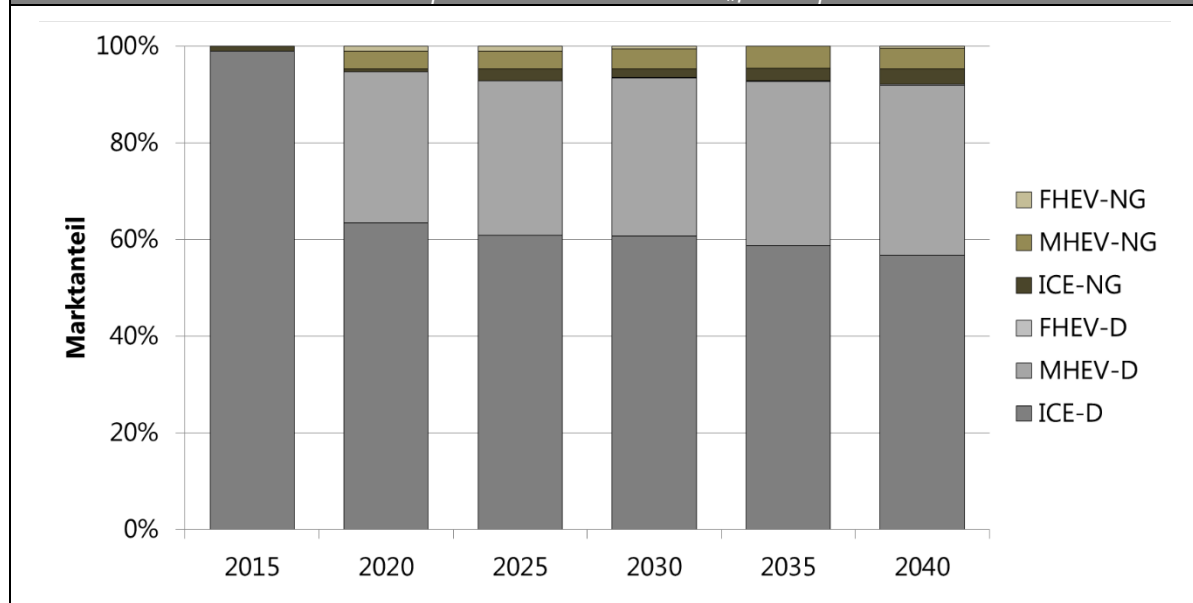
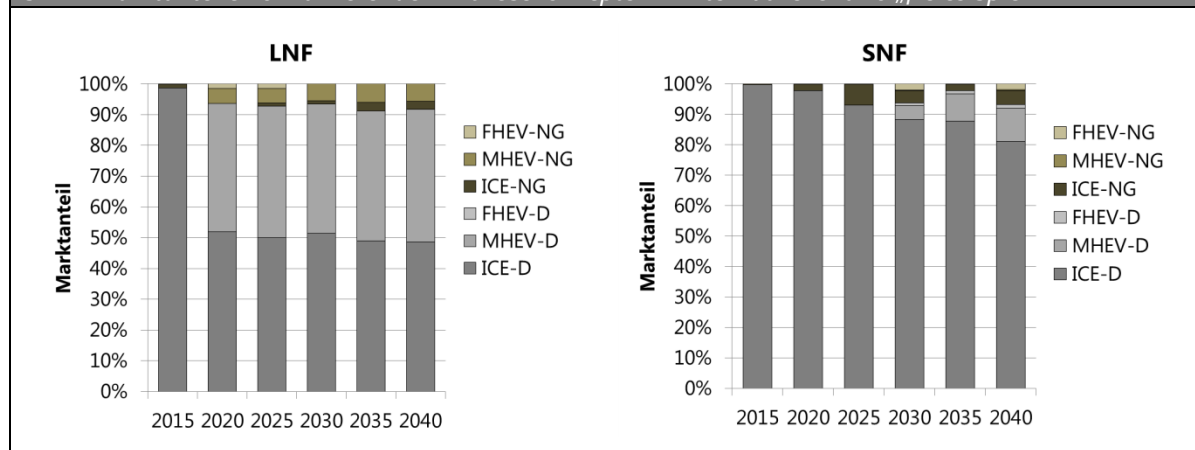


Abbildung 7.16 zeigt die Modellergebnisse des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach den leichten (linke Abbildung) und schweren Nutzfahrzeugen (rechte Abbildung). Der hohe Marktanteil hybridelektrischer Fahrzeugkonzepte ist im Hinblick auf die leichten Nutzfahrzeuge das Resultat gegebener Flottenzielwerte. Zur Zielerreichung ist demnach ein geringer Elektrifizierungsgrad ausreichend. MHEV-D-Fahrzeugkonzepte dominieren den Gütertransport im Nahbereich und erreichen zudem hohe Marktanteile hinsichtlich des Gütertransports im Regionalbereich. Mit Erdgas betriebene Fahrzeugkonzepte erreichen ausschließlich bezüglich des Gütertransports im Fernbereich Marktanteile und verbleiben somit in der Nische.

Abbildung 7.16: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - Marktanteile konkurrierender Antriebskonzepte im Alternativszenario „freies Spiel“

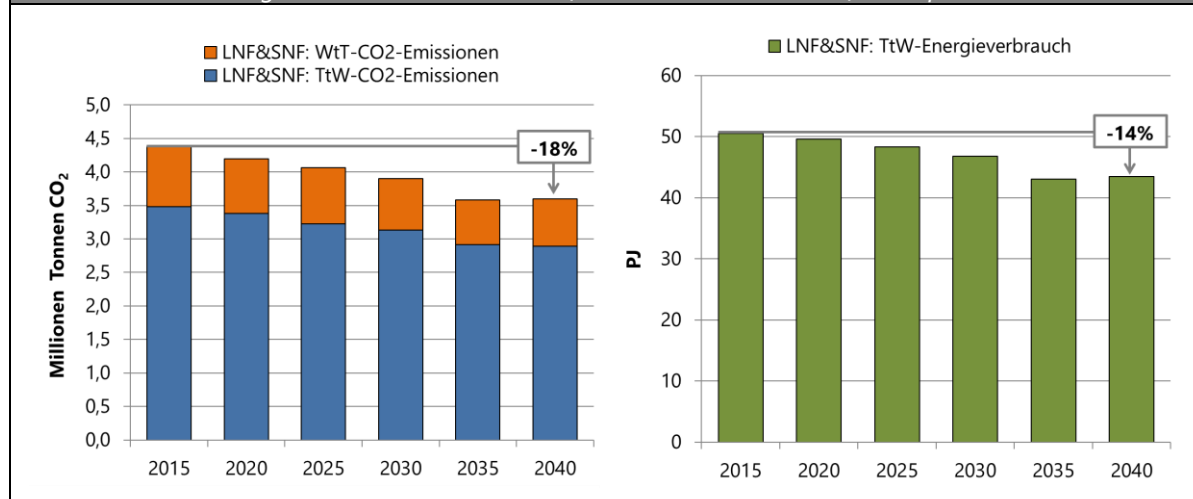


Aufgrund nicht vorhandener Flottenzielwerte und der damit nicht vorhandenen Malus-Regelung zum Vorteil CO₂-armer Fahrzeugkonzepte, bleibt der Marktanteil hybridelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge marginal und variiert zwischen 5 % und 11 %. Insgesamt dominiert das ICE-D-Fahrzeugkonzept deutlich, wohingegen erdgasbetriebene Fahrzeugkonzepte Nischenmärkte bedienen. ICE-NG-Fahrzeugkonzepte dominieren deutlich das Fahrzeugsegment 18t zGG. Weitere wesentliche Marktanteile werden im Regionalbereich des Segments 12t zGG und im Fernbereich der Segmente 12t zGG und 26t zGG erreicht. MHEV-Fahrzeugkonzepte erlangen die wesentlichen Marktanteile im Regionalbereich des Segments 40t zGG und im Nahbereich der Segmente 7,5t zGG und 26t zGG.

Die zum Jahr 2040 resultierende Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2015 beträgt, den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) betreffend, 18 %. Die Reduktion des Energieverbrauchs im gleichen Betrachtungszeitraum beträgt 14 % (siehe Abbildung 7.17). Dabei erhöhen sich die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte um 5 % von 50.406 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 52.945 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Im Mittel beträgt die Steigerung 4 %. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 4 % (3 % im Mittel), von 39.259 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 40.737 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingespar-

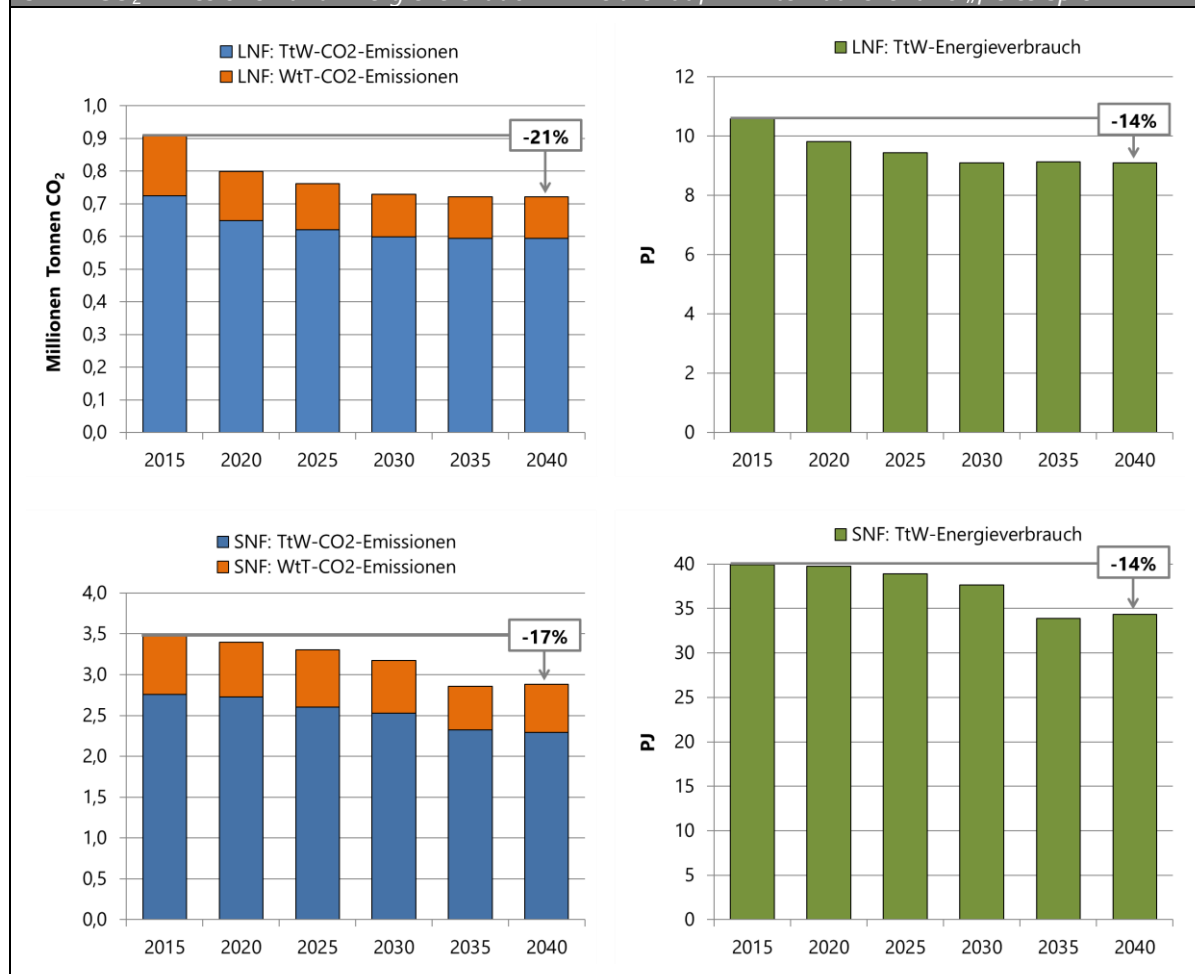
te WtW-CO₂-Emissionen betragen 880 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf (2015-2040) betragen diese im Mittel 2.062 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

Abbildung 7.17: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (LNF & SNF) - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „freies Spiel“



Die WtW-CO₂-Emissionen der leichten Nutzfahrzeuge werden um 21 % reduziert und eine Reduktion des Energieverbrauchs in Höhe von 14 % erreicht. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich um 6 % von 32.080 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 34.154 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 1 %, von 29.733 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 30.165 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen im Jahr 2040 2.221 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 3.621 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen um 17 % und eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 14 % erreicht. Die gewichteten Investitionskosten pro Fahrzeug der Neuwagenflotte erhöhen sich dabei um 4 % von 104.964 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2015 auf 108.889 EUR₂₀₁₀ im Jahr 2040. Die gewichteten RCO pro Jahr steigern sich um 7 %, von 67.619 EUR₂₀₁₀ in 2015 auf 72.211 EUR₂₀₁₀ in 2040. Die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen betragen 548 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂ zum Jahr 2040. Im Zeitverlauf betragen diese im Mittel 417 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂.

Abbildung 7.18: Modellergebnis des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes separiert nach LNF & SNF - CO₂-Emissionen und Energieverbrauch im Zeitverlauf im Alternativszenario „freies Spiel“



Die CO₂-Emissionen der Neuwagenflotte bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge orientieren sich in guter Näherung an den vorgegebenen Zielwerten. Zum Jahr 2030 wird eine Reduktion der Flottenemissionen um 14 % erreicht, welche sich aufgrund keiner weiteren Verschärfungen der Zielwerte bis 2040 lediglich um zusätzlich ein Prozent verringert. Ebenfalls moderat ist die Reduktion der Flottenemissionen hinsichtlich der einzelnen Segmente der schweren Nutzfahrzeuge. Mit einer Reduktion in Höhe von 20 % zum Jahr 2040 leistet das Fahrzeugsegment 40t zGG dabei den größten Beitrag. Im Gegensatz zu den leichten Nutzfahrzeugen erfolgt die wesentliche Emissionsreduktion bei den schweren Nutzfahrzeugen zwischen den Jahren 2030 und 2040 (siehe Tabelle 7.6). Bedingt wird dies durch die höheren Jahresfahrleistungen in Kombination mit der zunehmenden Erhöhung des Dieselpreises.

Tabelle 7.6: Reduktion der CO₂-Flottenemissionen im Alternativszenario „freies Spiel“ und Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten

Fahrzeugsegment	Mittelwert der jährlichen Abweichungen zu den vorgegebenen Zielwerten	Reduktion der CO ₂ -Flottenemissionen	
		2030 zu 2015	2040 zu 2015
3,5t zGG	0 %	14 %	15 %
7,5t zGG	keine Zielwertvorgaben	1 %	2 %
12t zGG	keine Zielwertvorgaben	1 %	3 %
18t zGG	keine Zielwertvorgaben	5 %	9 %
26t zGG	keine Zielwertvorgaben	5 %	10 %
40t zGG	keine Zielwertvorgaben	8 %	20 %

7.4 Einordnung der Simulationsergebnisse in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten

Um eine Einordnung der Simulationsergebnisse in den Kontext vorangegangener Forschungsergebnisse zu ermöglichen, wird eine Übersicht der Marktanteile zu den jeweils betrachteten Antriebskonzepten erstellt. Hierfür werden die im Rahmen von Kapitel 1.1 benannten Arbeiten zur Marktdiffusion alternativer Antriebskonzepte herangezogen, deren Untersuchungen den deutschen bzw. europäischen Markt umfassen. Die Einordnung der Simulationsergebnisse wird dabei separat bezüglich der leichten und schweren Nutzfahrzeuge vorgenommen sowie grafisch dargestellt, da eine Betrachtung des Gesamtmarktes (LNF & SNF), wie im Rahmen der Arbeit vorgenommen, bisher nicht erfolgte. Ausgewertet wurden die Ergebnisse für die Betrachtungsjahre 2020, 2025, 2030, 2035 und 2040. Die betrachteten Antriebstechnologien sind: ICE-NG, HEV⁵³, PEV⁵⁴ und FCEV. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist nicht sinnvoll, da sich die betrachteten Forschungsarbeiten in den getroffenen Annahmen, im Betrachtungsumfang und dem Modellierungsansatz zum Teil deutlich unterscheiden.

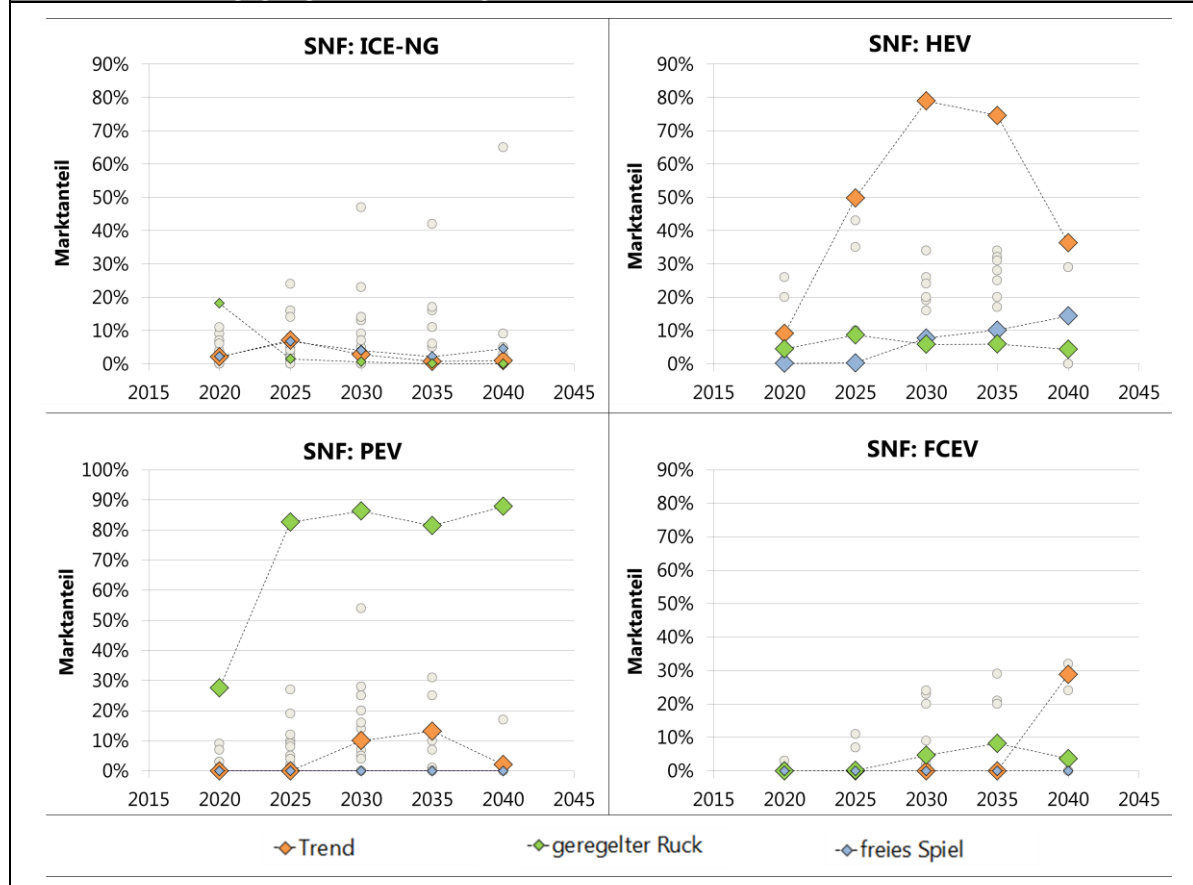
Die Gegenüberstellung der Marktanteile verschiedener Antriebskonzepte bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge zeigt generell eine große Streuung. Die szenarioübergreifend ermittelten ICE-NG-Marktanteile ordnen sich überwiegend im unteren Be-

⁵³ HEV umfassen dabei die Fahrzeugkonzepte MHEV und FHEV.

⁵⁴ PEV umfassen die Fahrzeugkonzepte PHEV, BEV und REEV.

reich (<10 %) innerhalb der gegebenen Studienbandbreiten ein. In Abhängigkeit des betrachteten Szenarios und der Betrachtungsjahre wurden für HEV-Antriebskonzepte teils deutlich höhere Marktpotentiale, bis zu 79 % zum Jahr 2030, ermittelt. Dies trifft ebenso für PEV-Antriebskonzepte mit einem ermittelten Marktpotential von bis zu 88 % zum Jahr 2040 zu. Hinsichtlich der FCEV-Antriebskonzepte wird von einer moderateren Entwicklung ausgegangen (siehe Abbildung 7.19). Wesentliche Einflussgrößen dieser Entwicklungen sowie wesentliche Unterscheidungsmerkmale der durchgeführten Szenarioanalysen stellen dabei die Berücksichtigung von CO₂-Flottenzielwerten und die Nutzung von Synergieeffekten dar.

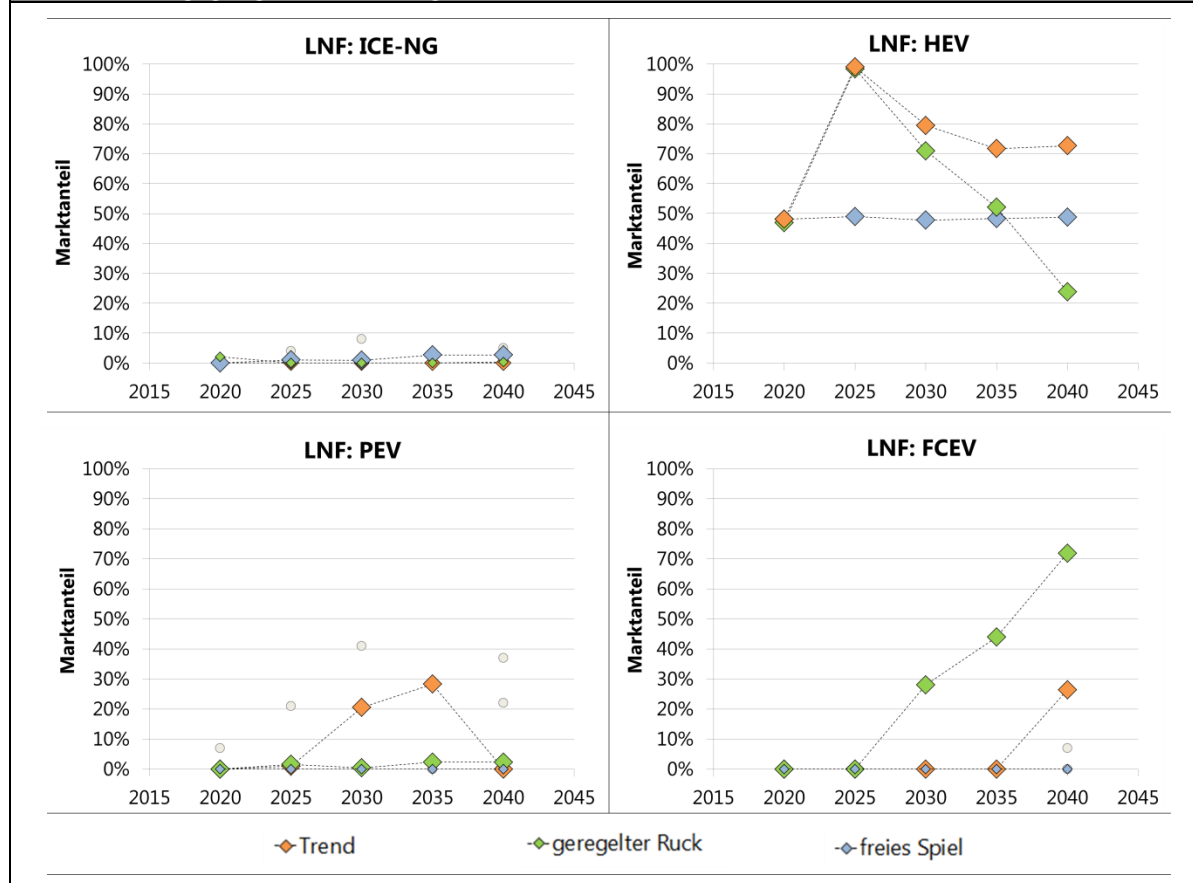
Abbildung 7.19: Einordnung der Simulationsergebnisse bezüglich der schweren Nutzfahrzeuge in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten



Die Gegenüberstellung der Marktanteile verschiedener Antriebskonzepte bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge zeigt ebenfalls eine große Streuung. Im Vergleich zu den schweren Nutzfahrzeugen, mit sechs herangezogenen Forschungsarbeiten, ist die

Datenverfügbarkeit hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge, mit zwei herangezogenen Forschungsarbeiten, weitaus eingeschränkter. Im Hinblick auf ICE-NG-Antriebskonzepte sind die Szenarioergebnisse innerhalb der gegebenen Studienbandbreiten einzuordnen. Aufgrund fehlender Daten zu Marktanteilen von HEV-Antriebskonzepten kann eine Einordnung der Ergebnisse nicht erfolgen. Die Szenarioergebnisse lassen in Abhängigkeit des Szenarios auf hohe bis sehr hohe Marktpotentiale schließen. Die Marktpotentiale von PEV-Fahrzeugkonzepten werden insgesamt geringer eingeschätzt. Im Gegensatz dazu wird das Marktpotential von FCEV-Fahrzeugkonzepten deutlich höher bewertet (siehe Abbildung 7.20).

Abbildung 7.20: Einordnung der Simulationsergebnisse bezüglich der leichten Nutzfahrzeuge in den Kontext vorangegangener Forschungsarbeiten



Die tabellarischen Übersichten der herangezogenen Forschungsarbeiten inklusive der jeweiligen Marktanteile sind dem Anhang I, den Tabellen I.1 bis I.3, zu entnehmen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Modellansatz zur systemischen Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge entwickelt und hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes in Deutschland angewendet. Als Grundlagen wurde hierfür das Betrachtungssystem charakterisiert (siehe Kapitel 2) und die technische Ausgangsbasis für Nutzfahrzeuge mit sowohl konventionellen als auch alternativen Antriebstechnologien erarbeitet (siehe Kapitel 3). Anschließend wurde ein ganzheitliches und systemisch konsistentes techno-ökonomisches Bewertungsmodell entwickelt, um eine vergleichende und transparente Bewertung konkurrierender Antriebsstrangkonzpte sicherzustellen (siehe Kapitel 4). Weiterhin erfolgte die Erläuterung der Vorgehensweise zur Ermittlung von Nutzwerten von Technologieelementen des Technologieportfolios. Die Nutzwertanalyse dient zur Bestimmung anwendungsspezifischer Potentiale und zur Strukturierung des komplexen Bewertungsproblems bezüglich zukünftiger Technologieelemente (siehe Kapitel 5). Nachfolgend wurde der entwickelte Modellansatz zur systemischen Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte für Nutzfahrzeuge erörtert und im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten verifiziert sowie validiert (siehe Kapitel 6). Weiterhin wurden verschiedene Szenarioanalysen bis zum Jahr 2040 für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt durchgeführt (siehe Kapitel 7).

Im Folgenden werden der wissenschaftliche Mehrwert der vorliegenden Arbeit (siehe Kapitel 8.1) sowie die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Szenarioanalysen zusammengefasst (siehe Kapitel 8.2). Aus diesen Erkenntnissen werden Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung, der Industrie und der Wissenschaft abgeleitet (siehe Kapitel 8.3). Abschließend werden die Limitationen der vorliegenden Arbeit aufgezeigt und ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf gegeben (siehe Kapitel 8.4).

8.1 Wissenschaftlicher Mehrwert

Die Arbeit verfolgt einen Modellansatz zur systemischen Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes in Deutschland. Dieser zeichnet sich gegenüber bisherigen Analysen insbesondere durch die nun im Folgenden erläuterten Eigenschaften aus.

Es erfolgte eine ganzheitliche und konsequent transportaufgabenspezifische Betrachtung des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes. Dieser umfasst sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge und differenziert zwischen drei wesentlichen Transportaufgaben im gewerblichen Verkehr: Gütertransport im Nahbereich, Gütertransport im Regionalbereich und Gütertransport im Fernbereich. Dem „*bottom-up*“-Prinzip folgend wurden zunächst Teilprobleme detailliert gelöst, um anschließend durch die Verknüpfung der Erkenntnisse das übergeordnete Ziel der Arbeit, die Durchführung umfassender Szenarioanalysen zur Marktdiffusion konkurrierender Antriebskonzepte hinsichtlich des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes in Deutschland, zu erreichen. Mit hohem technologischen Detaillierungsgrad wurden insgesamt vierzehn unterschiedliche Antriebsarchitekturen von konventionellen Antriebskonzepten über verschiedene Hybridkonzepte bis hin zu vollelektrischen Antrieben mit Batterie bzw. Brennstoffzelle bezüglich sechs verschiedener Fahrzeugsegmente: 3,5t zGG, 7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG und 40t zGG, untersucht. Um eine vergleichende und transparente Bewertung konkurrierender Antriebsstrangkonzepete sicherzustellen, wurde ein ganzheitliches und systemisch konsistentes techno-ökonomisches Bewertungsmodell entwickelt, welches in Abhängigkeit der jeweiligen Transportaufgabe die RCO fahrzeugkonzeptindividuell bestimmt. Hervorzuheben sind die transportaufgabenspezifische Ermittlung des Energieverbrauchs, die Berücksichtigung ermittelter Instandhaltungskosten und die Anwendung eines neuen Ansatzes zur Abschätzung von Restwerten. Weiterhin stellen die Nutzwertanalyse zukünftiger Technologieelemente mithilfe der Methode des „*House of Technology*“, die agentenbasierte Marktmodellierung sowie die implementierte Orientierung an vorgegebenen CO₂-

Flottenzielwerten eine Besonderheit dar. Darüber hinaus ist die Implementierung einer Häufigkeitsverteilung von transportaufgaben- und fahrzeugsegmentspezifischen Jahresfahrleistungsclustern einmalig.

Aufgrund des hohen technologischen Detaillierungsgrades und des erweiterten Betrachtungsumfangs konnten, im Sinne der Förderung eines umfassenden Verständnisses des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes, soziotechnische Gestaltungsspielräume hinsichtlich der Marktdiffusion alternativer Antriebstechnologien vertieft analysiert und die Folgenbündel entsprechender Entscheidungsalternativen fundiert verdeutlicht werden. Insbesondere wurden hierbei die Implikationen für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt in Deutschland unter Berücksichtigung verschiedener CO₂-Regulierungsstrategien, des Einflusses von technologischen Übertragungseffekten (Synergieeffekte) ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, der Marktdurchdringung von Technologieelementen und im Rahmen dessen zudem eine Abschätzung des Marktpotentials autonom fahrender batterie- sowie brennstoffzellenelektrischer Nutzfahrzeugkonzepte, aufgezeigt. Ebenso wurden vielversprechende Anwendungsfälle für alternative Antriebskonzepte und die treibenden Fahrzeugsegmente thematisiert. Somit konnten bestimmende Faktoren zur Beeinflussung des Markthochlaufs von alternativen Antriebstechnologien identifiziert werden und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung und Industrie erfolgen.

8.2 Zentrale Ergebnisse der Szenarioanalysen

Der Markteintritt alternativer Antriebsstrangkonzeppte und die Elektrifizierungsintensität sind in hohem Maße durch die verfolgte CO₂-Regulierungsstrategie und durch nutzbare Synergieeffekte bestimmt.

Im Hinblick auf das Referenzszenario „*moderate Trendentwicklung*“ führt eine moderate CO₂-Regulierung zu einer fortwährenden Dominanz hybrider Antriebsstrangkonzeppte mit steigendem Elektrifizierungsgrad (siehe Abbildung 8.1). Hybride Antriebs-

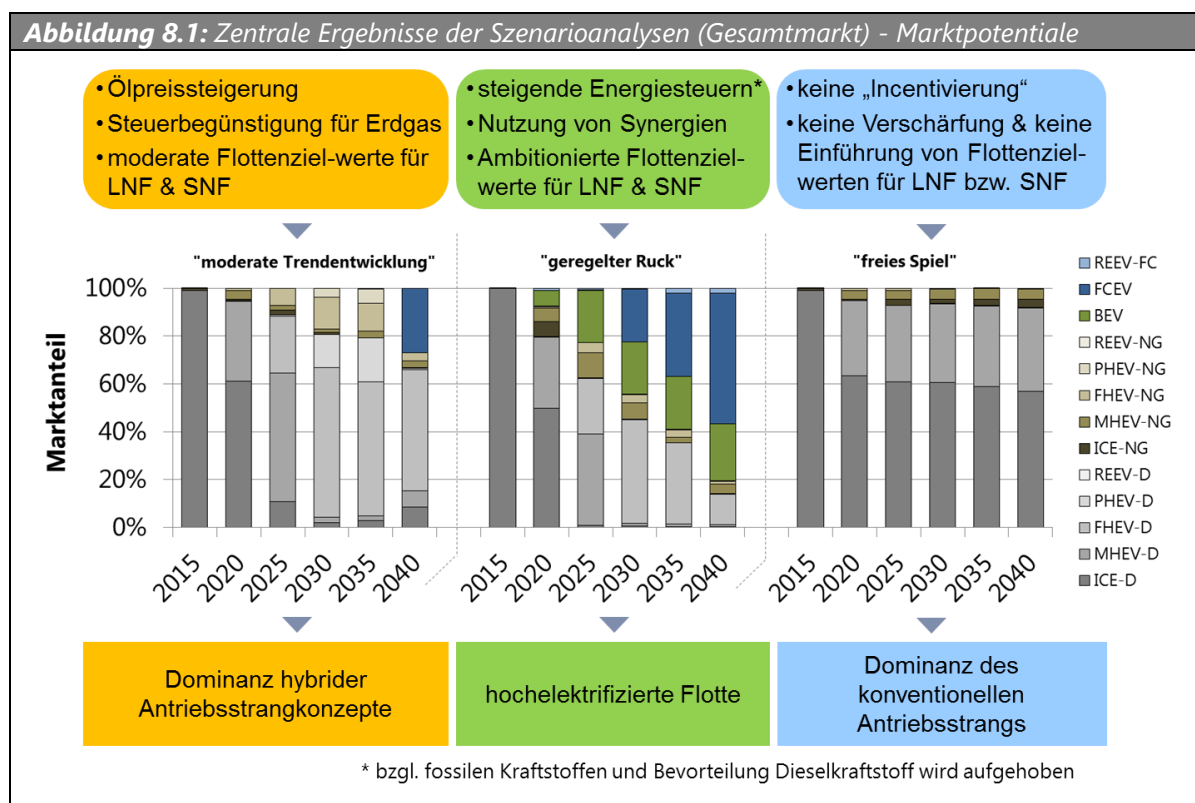
konzepte erreichen dabei zweitweise Marktanteile bis zu 97 %. Durch steigende Kraftstoffpreise und fortschreitende technologische Entwicklungen erfolgt eine Intensivierung des Wettbewerbs konkurrierender Antriebskonzepte. PHEV-Fahrzeugkonzepte stellen dabei eine Brückentechnologie dar und werden durch FCEV-Fahrzeugkonzepte verdrängt. Der Maximal erreichte Marktanteil von FCEV-Fahrzeugkonzepten beträgt 27 % und wird zum Jahr 2040 erreicht. BEV-Fahrzeugkonzepte setzen sich zeitweise in Nischenanwendungen, mit Marktanteilen < 1 %, durch. Langfristig schwindet deren Konkurrenzfähigkeit, da der Erfahrungskurveneffekt für das Batteriesystem vom Typ Hochenergie im Vergleich zum Brennstoffzellensystem zu gering ist.

Die dem Alternativszenario „*geregelter Ruck*“ zugrunde gelegte ambitionierte CO₂-Regulierung in Kombination mit der Nutzung von Synergieeffekten, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, resultiert in einem deutlich frühzeitigeren Markteintritt und einer beschleunigten Marktdiffusion lokal emissionsfreier Antriebskonzepte (siehe Abbildung 8.1). Dabei erreichen FCEV-Fahrzeugkonzepte hinsichtlich der leichten Nutzfahrzeuge signifikante Marktanteile (bis zu 72 % zum Jahr 2040), wohingegen BEV-Fahrzeugkonzepte in Nischenanwendungen (bis 2 % Marktanteil) verbleiben. Überwiegend sind die jährlichen Laufleistungen sowie die Anschaffungskostendifferenz im Vergleich zu FCEV-Fahrzeugkonzepten nicht ausreichend hoch genug, um die Zusatzkosten der benötigten EVSE und den niedrigeren Steuervorteil auszugleichen bzw. zu überkompensieren. Im Gegensatz dazu sind die jährlichen Jahresfahrleistungen der schweren Nutzfahrzeuge deutlich höher, was in signifikanten Marktpotentialen (bis zu 88 %) für BEV-Fahrzeugkonzepte resultiert. FCEV-Fahrzeugkonzepte verbleiben in Nischenanwendungen (bis zu 8 % Marktanteil).

Im Alternativszenario „*freies Spiel*“ wird die bestehende CO₂-Regulierung für leichte Nutzfahrzeuge nicht verschärft und es erfolgt keine Einführung einer CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge. Dabei wird deutlich, dass neben ICE-D- und ICE-NG-Fahrzeugkonzepten, hybride Antriebskonzepte mit geringem Elektrifizie-

rungsgrad (MHEV-Fahrzeugkonzepte) wesentliche Marktanteile (bis zu 39 %) erreichen. PHEV-, BEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepte erlangen keine Wettbewerbsfähigkeit und verfehlen den Markteintritt (siehe Abbildung 8.1).

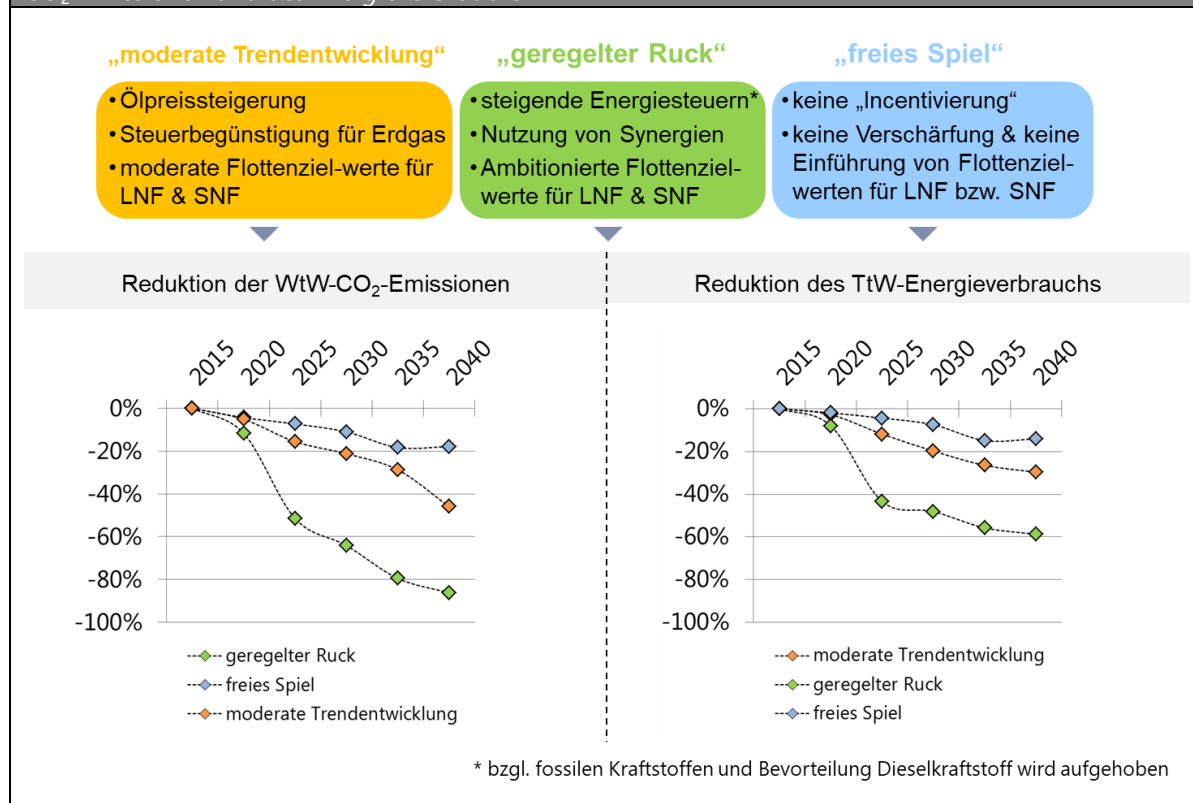
Mit Erdgas betriebene Fahrzeugkonzepte verbleiben szenarioübergreifend in der Nische. Hohe Jahresfahrleistungen sind erforderlich, um die Kostennachteile aufgrund hoher Instandhaltungskosten und geringer Restwerte überzukompensieren. Daher ist das maßgebliche Anwendungsfeld der Gütertransport im Fernbereich. Treibende Fahrzeugsegmente sind die Segmente 12t zGG, 26t zGG und insbesondere das Segment 18t zGG. Hinsichtlich der Einhaltung von CO₂-Flottenzielwerten stellen erdgasbetriebene Fahrzeugkonzepte eine Brückentechnologie bis zur Wettbewerbsfähigkeit lokal emissionsfreier Antriebskonzepte dar.



Im Besonderen bewirken umfassende politische Maßnahmen wie z.B. sukzessive Erhöhung der Energiesteuern auf fossile Kraftstoffe, Aufhebung der Energiesteuervorteile des Dieseldieselfkraftstoffs, keine Steuerbegünstigung von Erdgas und eine weitrei-

chende Verschärfung der Flottenzielwerte, in hohem Maße eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen, des Energieverbrauchs und der Erdölabhängigkeit des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes (siehe Abbildung 8.2). Durch eine moderate Entwicklung der heute zu beobachtenden Trends, ohne umfassende politische Maßnahmen sowie ohne signifikante Impulse in der Technologieentwicklung oder ausgehend von den Käufer-Agenten, wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes zum Jahr 2040 im Vergleich zum Basisjahr 2015 um 46 % erreicht. Die Reduktion des Energieverbrauchs beträgt 30 %. Zum Jahr 2040 basieren 73 % der zum Betrieb der Neuwagenflotte eingesetzten Energie auf Erdöl. Infolge umfassender politischer Maßnahmen und moderater Impulse ausgehend von den Nachfragern sowie bezüglich der Technologieentwicklung wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes zum Jahr 2040 im Vergleich zum Basisjahr 2015 um 86 % erreicht. Die Reduktion des Energieverbrauchs beträgt 59 %. Zum Jahr 2040 beträgt die zum Betrieb der Neuwagenflotte eingesetzte und auf Erdöl basierende Energie 20 %. Ohne weitere Impulse der Regierung, von den Nachfragern oder hinsichtlich der Technologieentwicklung, wird eine Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes zum Jahr 2040 im Vergleich zum Basisjahr 2015, um 18 % erreicht. Die Reduktion des Energieverbrauchs beträgt 14 %. Zum Jahr 2040 basieren 100 % der zum Betrieb der Neuwagenflotte eingesetzten Energie auf Erdöl.

Abbildung 8.2: Zentrale Ergebnisse der Szenarioanalysen (Gesamtmarkt) – Reduktion der WtW-CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs



Umfassende politische Maßnahmen in Kombination mit der Nutzung von Synergieeffekten ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen versprechen eine optimale Kosten-Nutzen-Relation im Sinne von Mehrkosten je eingesparter Tonne CO₂. Die höchste Steigerung der mittleren Investitionskosten der Neuwagenflotte des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes erfolgt im Referenzszenario „*moderate Trendentwicklung*“. Im Betrachtungszeitraum beträgt diese im Mittel 16 % (= 8.225 EUR₂₀₁₀). Die Steigerung der mittleren RCO beträgt 5 % (= 2.043 EUR₂₀₁₀). Die zusätzlichen Anschaffungskosten je eingesparter Tonne WtW-CO₂-Emissionen betragen im Mittel 3.260 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Die geringste Steigerung der mittleren Investitionskosten der Neuwagenflotte des Güterkraftverkehr-Neuwagenmarktes erfolgt im Referenzszenario „*freies Spiel*“. Im Betrachtungszeitraum beträgt diese im Mittel 4 % (= 2.206 EUR₂₀₁₀). Die Steigerung der mittleren RCO beziffert sich auf 3 % (= 1.198 EUR₂₀₁₀). Im Betrachtungszeitraum betragen die zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen im Mittel 2.062 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Die ge-

ringsten zusätzlichen Anschaffungskosten pro eingesparte WtW-CO₂-Emissionen ergeben sich im Alternativszenario „*geregelter Ruck*“. Im Betrachtungszeitraum betragen diese im Mittel 1.314 EUR₂₀₁₀/Tonne WtW-CO₂. Die mittlere Steigerung der durchschnittlichen Investitionskosten der Neuwagenflotte des Güterkraftverkehrs-Neuwagenmarktes beträgt hierbei 13 % (= 6.466 EUR₂₀₁₀). Die mittlere Steigerung des RCO-Mittels beträgt hierbei 4 % (= 1.607 EUR₂₀₁₀).

Brennstoffzellen- bzw. batterietechnologische Übertragungseffekte (Synergieeffekte), ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, stärken die Wettbewerbsfähigkeit elektrifizierter Nutzfahrzeugkonzepte und beschleunigen den Markteintritt sowie die Marktdiffusion von brennstoffzellen- bzw. batterieelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugkonzepten. Der Einfluss ist dabei maßgeblich durch die Höhe der Übertragungseffekte und die politischen Rahmenbedingungen bestimmt.

Technologieelemente der Kategorie „Reifen & Räder“ erreichen mit Abstand die höchste Marktdurchdringung gefolgt von den Kategorien „Antriebsstrang“, „Aerodynamik“, „Sonstiges“ und „Leichtbau“ (in absteigender Reihenfolge).

Autonome batterie- und brennstoffzellenelektrische Fahrzeugkonzepte besitzen sehr hohe Marktpotentiale. Weiterhin ermöglicht es die volle Automation, den Markteintritt batterie- und brennstoffzellenelektrischer Fahrzeugkonzepte früher herbeizuführen und diesen zu beschleunigen.

8.3 Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger in der Regierung und der Industrie

Die Erreichung einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen und der Erdölabhängigkeit im Straßengüterverkehr bedarf eines verstärkten Engagements vonseiten des Staats. Zielführend ist hierfür eine ambitionierte CO₂-Regulierung für sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge. Zudem ist dies ein deutliches Signal, den Markteintritt hocheffizienter Antriebskonzepte frühzeitig zu forcieren und deren Marktdiffusion zu beschleunigen. Weiterhin bleibt die Technologieoffenheit gewahrt.

Darüber hinaus stärkt eine sukzessive Erhöhung der Energiesteuern auf fossile Kraftstoffe und die Aufhebung der Bevorteilung von Dieselmotoren die Wettbewerbsfähigkeit elektrifizierter Antriebstechnologien. Auch versprechen die soeben benannten umfassenden politischen Maßnahmen in Kombination mit der Nutzung von Synergieeffekten, ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen, eine optimale Kosten-Nutzen-Relation im Sinne von Mehrkosten je eingesparter Tonne CO₂ (WtW).

Im Sinne einer ganzheitlichen Bewertung alternativer Fahrzeugkonzepte ist zu empfehlen, dass im Rahmen einer CO₂-Regulierung neben den lokalen TtW-CO₂-Emissionen auch die CO₂-Emissionen der Energieerzeugung und –bereitstellung berücksichtigt werden. Bei ausschließlicher Betrachtung der TtW-CO₂-Emissionen werden elektrifizierte Fahrzeugkonzepte begünstigt, obwohl bei der Stromerzeugung nicht zu vernachlässigende Mengen an CO₂-Emissionen anfallen.

Neben direkten steuernden Eingriffen kann die Regierung auch durch die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen die Etablierung alternativer Antriebstechnologien fördern. Hierzu zählen u. a.:

- Schaffung von Privilegien im Straßengüterverkehr für emissionsarme Fahrzeugkonzepte (wie z. B. intelligentere Gebührenerhebung für die Infrastrukturnutzung, Ausweitung der Belieferungszeiten, spezielle Be- und Entladezonen, etc.)
- Unterstützung des Ausbaus nutzfahrzeuggerechter Wasserstofftankstellen (z. B. durch vereinfachte Genehmigungsverfahren oder Bereitstellung von Flächen im öffentlichen Raum)
- Finanzielle Förderung von Forschungs-, Ausbildungsprogrammen und Demonstrationsprojekten zur Stärkung der entsprechenden Kompetenzen an Hochschulen, öffentlichen Forschungseinrichtungen und in der Industrie

Vor dem Hintergrund der nun auch in Europa sich abzeichnenden Einführung einer CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge ist die Entwicklung emissionsarmer An-

triebe für Nutzfahrzeughersteller unumgänglich. Um Abgaben bei Überschreitung der vorgegebenen Grenzwerte zu vermeiden, sollte es im Eigeninteresse der Nutzfahrzeugindustrie sein, die Etablierung elektrifizierter Antriebskonzepte im Markt voranzutreiben. Um den anfänglich hohen technologischen Kosten zu begegnen, könnten Nutzfahrzeughersteller, sofern möglich, technologische Übertragungseffekte ausgehend aus dem Markt für Personenkraftwagen nutzen, um die Eintrittsbarrieren zu überwinden und durch Erfahrungskurveneffekte von einer beschleunigten Kostendegression profitieren zu können. Alternativ können herstellerinterne Subventionen in Form verminderter Gewinnmargen dabei helfen, erste Eintrittsbarrieren zu überwinden. Die Ergebnisse der Szenarioanalysen verdeutlichen, dass das benötigte Antriebsportfolio in Abhängigkeit der CO₂-Regulierung deutlich variiert. Insbesondere betrifft dies die Elektrifizierungsintensität der Neuwagenflotte. Unter der Voraussetzung einer moderaten CO₂-Regulierung und ohne die Möglichkeit der Nutzung von technologischen Übertragungseffekten (Synergieeffekte) wird empfohlen, hybride Antriebskonzepte (MHEV, FHEV und PHEV) und Maßnahmen zur Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs kurz- und mittelfristig zu forcieren. Langfristig sollte die Brennstoffzellentechnologie an Bedeutung gewinnen. Für den Fall einer ambitionierten CO₂-Regulierung und bei Nutzung von Synergieeffekten kann empfohlen werden, hybride Antriebskonzepte kurzfristig zu forcieren. Mittel- bis langfristig könnte eine starke Fokussierung auf batterie- und brennstoffzellenelektrisch betriebene Fahrzeugkonzepte erfolgen. Dabei besitzen FCEV-Fahrzeugkonzepte hohe Marktpotentiale im Hinblick auf die leichten Nutzfahrzeuge. BEV-Fahrzeugkonzepte hingegen zeigen segmentübergreifend hohe Marktpotentiale hinsichtlich der schweren Nutzfahrzeuge. Wird die bestehende CO₂-Regulierung für leichte Nutzfahrzeuge nicht verschärft und es erfolgt keine Einführung einer CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge, bleibt als Handlungsoption, kurz-, mittel- und langfristig die Entwicklung hybrider Antriebskonzepte mit geringem Elektrifizierungsgrad (MHEV) zu begünstigen.

Weiterhin sollte die Entwicklung autonomer BEV- und FCEV-Fahrzeugkonzepte angestoßen werden. Die Weiterentwicklung mit Erdgas betriebener Antriebsstrangkonzep- te dürfte sich auf Transportanwendungen mit hohen Jahresfahrleistungen konzentrieren.

Eine weitestgehend globale Modul- und Plattformstrategie ist zu empfehlen, um im zunehmenden Wettbewerb konkurrierender Antriebstechnologien möglichst flexibel agieren zu können. Ebenso ermöglicht eine weitere Bündelung fahrzeugklassenspezifischer Entwicklungskompetenzen die Nutzung von Synergieeffekten. Zur Bewältigung des großen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs werden Partnerschaften und Kooperationen mit auch neuen Herstellern und Zulieferern bezüglich disruptiver Fahrzeugkonzepte und geeigneter Enabler-Technologien sowie wissenschaftlichen Einrichtungen und Forschungscampi erfolgsbestimmend.

Unter dem Ziel der Reduktion der CO₂-Emissionen und der Erdölabhängigkeit des Straßengüterverkehrs erwartet der Autor u.a. sowohl die Erarbeitung einer transparenten strategischen Vorgehensweise als auch die Erarbeitung eines tragbaren Umsetzungsplans mit Einbezug aller relevanten Stakeholder. Dafür ermöglicht das entwickelte Szenariomodell eine Folgenabschätzung für den Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt auf Basis verschiedenster Handlungsoptionen der Regierung, der Nutzfahrzeughersteller und der Nachfrager. Im Besonderen gilt dies für die Einführung einer CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge.

8.4 Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Im Allgemeinen erfordert die modellbasierte Simulation eine Abstraktion des realen Systems. Im Zuge dessen sind die resultierenden Ergebnisse stets von der Wahl der Modellgrenzen, der Relevanzentscheidungen über die betrachteten Merkmale und Effekte, der Erfassung der zeitlichen Verläufe sowie der Datenqualität abhängig.

Die im Rahmen der Arbeit vorgestellte systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte umfasst den deutschen Güterkraftverkehr-Neuwagenmarkt.

Die resultierenden Szenarien dienen zur qualitativen und in beschränktem Maße quantitativen Folgenabschätzung verschiedenster Entscheidungsalternativen des Staates, der Nutzfahrzeughersteller und der Nachfrager, im Besonderen hinsichtlich der Einführung einer CO₂-Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge. Im Gegensatz zu Prognosen erlauben sie keine Aussage über die tatsächlich zu erwartenden Entwicklungen. Im Hinblick auf eine für den europäischen Raum geltende CO₂-Regulierung wird empfohlen, das Szenariomodell um weitere Länder zu ergänzen. Hierbei ist insbesondere eine Kopplung mit dem Simulationsinstrument VECTO⁵⁵ anzustreben. Weiterhin ist für eine Beurteilung der CO₂-Emissionen des gesamten Straßengüterverkehrs das entwickelte Neuzulassungsmodell um ein Bestandsmodell zu erweitern. Die Integration von Life-Cycle-Analysen (LCA) ermöglicht die Erweiterung der kostenbasierten Perspektive um eine ganzheitliche ökologische Perspektive. Um die Konkurrenzfähigkeit synthetischer Kraftstoffe zu analysieren und damit einem, für die Mobilität und Energiewende zentralen Thema gerecht zu werden, sollte eine Integration weiterer Kraftstoffpfade erfolgen. Dies bedingt gegebenenfalls auch eine Erweiterung bzw. Anpassung von Fahrzeugeigenschaften. Ebenso ist das autonome Fahren ein zentrales Thema. Diesbezüglich wären das Marktpotential der verschiedenen Autonomiestufen unter Berücksichtigung sich ergebender Freiheitsgrade bei der Gesamtfahrzeugkonzeptentwicklung sowie der Fahrzeugnutzung und der sich ergebende Einfluss auf die Reduktion der CO₂-Emissionen zu untersuchen.

Für eine noch realitätsnähere Darstellung der zukünftigen Marktsituation wären die Integration typischer Markthochläufe neu entwickelter Fahrzeugkonzepte, eine Unterscheidung zwischen Kaufen und Leasen sowie die Erweiterung der Kaufentscheidung um nutzenbasierte Aspekte zu empfehlen.

Bestehende Unsicherheiten können im Besonderen durch eine repräsentativ empirische Erhebung der Jahresfahrleistungen von Nutzfahrzeugen in Abhängigkeit des

⁵⁵ Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (VECTO). Programm zur Berechnung des Energieverbrauchs von Fahrzeugen, welches ab 2019 für die CO₂-Zertifizierung neuer europäischer Lastkraftwagen herangezogen wird.

Fahrzeugalters, die eine fahrzeugsegmentspezifische Ableitung von Häufigkeitsverteilung ermöglicht, minimiert werden. Dies trifft ebenfalls auf eine repräsentativ empirische Erhebung der Amortisationsanforderungen von Flottenbetreibern zu.

Zur Erstellung umfassender Zukunftsszenarien des Verkehrssektors wird weiterführend die Kopplung mit Pkw-Neuzulassungsmodellen, Verkehrsnachfragemodellen und Energiemarktmodellen empfohlen.

Literaturverzeichnis

- [1] „AG Energiebilanzen e.V. | Auswertungstabellen“. <https://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-auswertungstabellen.html> (zugegriffen Jan. 25, 2016).
- [2] S. Radke, Deutschland, und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Hrsg., *Verkehr in Zahlen. 45: 2016/2017*, 45. Jg. Hamburg: Dt. Verkehrs-Verl, 2016.
- [3] G. Aberle, *Transportwirtschaft: einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*, 4., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2003.
- [4] C. Kille, N. Schmidt, B. Schroer, und A. Wandel, „Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs“, Fraunhofer IIS, KPMG, Apr. 2008.
- [5] M. Schubert u. a., „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht“, BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, Intraplan Consult GmbH, Ingenieursgruppe IVV GmbH & Co. KG, Planco Consulting GmbH, 96.0981/2011, Juni 2014.
- [6] Europäische Kommission, „Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament - Strategie zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge“. Mai 21, 2014.
- [7] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Nutzfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten)“. Jan. 2011.
- [8] C. Heidt u. a., „Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen“, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, INFRAS AG Forschung und Beratung Bern, Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH Graz, Dez. 2019.
- [9] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2014“. Jan. 2014.
- [10] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeugzulassungen (FZ) - Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen der Jahre: 2010, 2011, 2012, 2013 und 2014“.
- [11] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 442/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 23. April 2009, zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*.
- [12] Europäische Kommission, „WEISSBUCH - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem“.
- [13] H. Baker, R. Cornvell, E. Koehler, und J. Patterson, „Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles“. Juni 2009.

- [14] C. Cooper, F. Kamakaté, T. Reinhart, M. Kromer, und R. Wilson, „Reducing Heavy-Duty Long Haul Combination Truck Fuel Consumption and CO₂-Emissions - Final Report“, NESCCAF, ICCT, TIAX, LLC, Southwest Research Institut, Okt. 2009.
- [15] National Research Council (U.S.) und National Research Council (U.S.), Hrsg., *Reducing the fuel consumption and greenhouse gas emissions of medium- and heavy-duty vehicles. Phase two, first report*. Washington, D.C: The National Academies Press, 2014.
- [16] National Research Council (U.S.), Hrsg., *Review of the 21st Century Truck Partnership. Second report*. Washington, DC: National Academies Press, 2012.
- [17] National Research Council (U.S.), Hrsg., *Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium- and heavy-duty vehicles*. Washington, D.C: National Academies Press, 2010.
- [18] N. Hill u. a., „Reduction and Testing of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Heavy Duty Vehicles – Lot 1: Strategy“, AEA technologies plc, Feb. 2011.
- [19] K. Law, M. D. Jackson, und M. Chan, „European Union Greenhouse Gas Reduction Potential for Heavy-Duty Vehicles“, TIAX, Dez. 2011.
- [20] M. Kloess, P. Prenninger, A. Huss, K. Könighofer, L. Canella, und R. Hass, „Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050“, TU Wien, Joanneum Research Forschungsgesellschaft, AVL List GmbH, Jan. 2011.
- [21] I. Olschewski und C.-S. Ernst, „Kurzstudie zum CO₂-Reduzierungspotential bei leichten Nutzfahrzeugen (N1) bis 2020“, Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University, 2013.
- [22] C.-S. Ernst, I. Olschewski, L. Eckstein, und C. Harter, „CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020 - Abschlussbericht 123320“, Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University, Aug. 2014.
- [23] T. Breemersch und L. Akkermans, „GHG reduction measures for the Road Freight Transport sector, An integrated approach to reducing CO₂ emissions from Heavy Goods Vehicles in Europe“, Transport & Mobility Leuven, Sep. 2014.
- [24] F. Hülsmann, M. Mottschall, F. Hacker, und P. Kasten, „Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050“, Öko-Institut e.V., Aug. 2014.
- [25] F. Dünnebeil, C. Reinhard, U. Lambrecht, A. Kies, S. Hausberger, und M. Rexeis, „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen“, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, TU Graz, Apr. 2015.

- [26] T. Reinhart, „Commercial Medium- and Heavy-Duty Truck Fuel Efficiency Technology Study – Report #1“, U.S. Department of Transportation, NHTSA, Report No. DOT HS 812 146, Juni 2015.
- [27] T. Reinhart, „Commercial Medium- and Heavy-Duty Truck Fuel Efficiency Technology Study – Report #2 (draft report)“, U.S. Department of Transportation, NHTSA, Juni 2015.
- [28] O. Delgado und N. Lutsey, „Advanced tractor-trailer efficiency technology potential in the 2020-2030 timeframe“, ICCT, Apr. 2015.
- [29] O. Delgado, F. Rodriguez, und R. Muncief, „Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020–2030 Time Frame“, ICCT, Juli 2017.
- [30] S. Safarianova, F. Noembrini, K. Boulouchos, und P. Dietrich, „Techno-Economic Analysis of Low-GHG Emission Light, Medium and Heavy Duty Vehicles“, ETH Zürich, FP7-TPT-2008-RTD-1, 2008.
- [31] N. Hill, A. Varma, J. Harries, J. Norris, und D. Kay, „A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050“, Apr. 2012.
- [32] A. Schrotten, G. Warringa, und M. Bles, „Marginal abatement cost curves for Heavy Duty Vehicles, Background report“, CE Delft, Juli 2012.
- [33] E. den Boer, S. Aarnink, F. Kleiner, und Pagenkopf, „Zero emissions trucks - An overview of state-of-the-art technologies and their potential“, CE Delft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Juli 2013.
- [34] H. Zhao, A. Burke, und L. Zhu, „Analysis of Class 8 Hybrid-Electric Truck Technologies Using Diesel, LNG, Electricity, and Hydrogen, as the Fuel for Various Applications“, gehalten auf der EVS27, Barcelona, Spain, Nov. 2013.
- [35] S. Löfstrand u. a., „Feasibility of Electrifying Urban Goods Distribution Trucks“, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Bd. 6, Nr. 1, S. 24–33, Apr. 2013, doi: 10.4271/2013-01-0504.
- [36] F. Hacker, R. von Waldenfels, und M. Mottschall, „Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen, Betrachtung von Gesamtnutzungskosten, ökonomischen Potentialen und möglicher CO₂-Minderung“, Öko-Institut e.V., Deutsches Dialog Institut, VDE, Feb. 2015.
- [37] D. Meszler, N. Lutsey, und O. Delgado, „Cost effectiveness of advanced efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2020-2030 time frame“, ICCT, Meszler Engineering Services, Apr. 2015.
- [38] F. Kleiner u. a., „Electrification of transport logistic vehicles: A techno-economic assessment of battery and fuel cell electric transporter“, gehalten auf der EVS28, Kintex, Korea, Mai 2015.
- [39] E. Shafiei, H. Stefansson, E. I. Asgeirsson, B. Davidsdottir, und M. Raberto, „Integrated Agent-based and System Dynamics Modelling for Simulation of Sustainable Mobility“, *Transp. Rev.*, Bd. 33, Nr. 1, S. 44–70, Jan. 2013, doi: 10.1080/01441647.2012.745632.

- [40] B. M. Al-Alawi und T. H. Bradley, „Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 21, S. 190–203, Mai 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.048.
- [41] T. Gnann und P. Plötz, „A review of combined models for market diffusion of alternative fuel vehicles and their refueling infrastructure“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 47, S. 783–793, Juli 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.022.
- [42] A. Kühn und M. Krail, „System-based analysis of diffusion of alternative drives and fuels for trucks“, gehalten auf der 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal, Juli 2010.
- [43] M. Krail und A. Kühn, „The Potential of Alternative Fuel Technologies and Of Efficiency Technologies For Heavy Goods Vehicles“, gehalten auf der 12th International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 2012.
- [44] T. P. Wright, „Factors Affecting the Cost of Airplanes“, *J. Aeronaut. Sci.*, Bd. 3, Nr. 4, S. 122–128, Feb. 1936, doi: 10.2514/8.155.
- [45] C. Seitz und O. Terzidis, „Market Penetration of Alternative Powertrain Concepts in Heavy Commercial Vehicles: A System Dynamics Approach“, gehalten auf der 32nd International Conference of the System Dynamics Society, Delft, Netherlands, Juli 2014.
- [46] C. Seitz, „Diffusion innovativer Antriebstechnologien zur CO₂-Reduktion von Nutzfahrzeugen - Empirische Untersuchung des organisationalen Adoptionsverhaltens und systemdynamische Prognose fuer den deutschen Automobilmarkt“, Karlsruhe, 2015.
- [47] T. Gnann u. a., „Teilstudie ‚Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential‘“, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Group, Karlsruhe, Aug. 2017.
- [48] „TRUCK5.1: Heavy Vehicle Market Penetration Model Documentation“, TA Engineering, Inc., Juli 2012.
- [49] J. Adolf, C. Balzer, F. Haase, B. Lenz, A. Lischke, und G. Knitschky, „SHELL Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren Lkw und Bus morgen? - Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040“, Shell Deutschland Oil GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Hamburg, 2016.
- [50] C. Tryggstad, N. Sharma, J. van der Staaij, und A. Keizer, „New reality: electric trucks and their implications on energy demand“, McKinsey & Company, Sep. 2017.
- [51] T. Schiller, M. Maier, und M. Büchle, „Global Truck Study 2016 - Lkw Märkte im Umbruch“, Deloitte, 2017.
- [52] O. Blanchard, *Macroeconomics*, 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice-Hall, 2000.
- [53] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 70010 – Systematik der Straßenfahrzeuge, Begriffe für Kraftfahrzeuge, Fahrzeugkombinationen und Anhängerfahrzeuge“. Beuth Verlag GmbH, Apr. 2001.

- [54] Amtsblatt der Europäischen Union, „Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 5. September 2007, zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge“.
- [55] Kraftfahrt-Bundesamt, „Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten)“. 2014 2009, [Online]. Verfügbar unter:
https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz26_n_uebersicht.html.
- [56] Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, Verkehrsaufkommen“. 2014 2006.
- [57] W. Appel u. a., *Nutzfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [58] „Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles – LOT 2, Development and testing of a certification procedure for CO₂ emissions and fuel consumption of HDV, Final Report“, University of Technology Graz - Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Jan. 2012.
- [59] H. Naunheimer, B. Bertsche, G. Lechner, J. Ryborz, und W. Novak, *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*, 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [60] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 13. Juli 2009, über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit*.
- [61] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 1222/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 25. November 2009, über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter*.
- [62] T. Schütz, Hrsg., *Hucho - Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort; mit 49 Tabellen*, 6. , vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [63] T. Rosenberger, Hrsg., *Lastauto-Omnibus-Katalog. 44. 2015, Sonderausg.*, Stand: August 2014. Stuttgart: Vereinigte Motor-Verl. [u.a.], 2014.
- [64] E. M. Rogers, *Diffusion of innovations*, 5th ed. New York: Free Press, 2003.
- [65] L. G. Tornatzky, M. Fleischer, und A. K. Chakrabarti, *The processes of technological innovation*. Lexington, Mass: Lexington Books, 1990.

- [66] Bundesamt für Güterverkehr, „Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs und des Werkverkehrs, Band USTAT 17“. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Unternehmen/Ustat/Ustat_2006.pdf?__blob=publicationFile.
- [67] A. Bänsch, *Käuferverhalten*, 9., durchges. und erg. Aufl. München: Oldenbourg, 2002.
- [68] S. Aarnink, J. Faber, und E. den Boer, „Market Barriers to Increased Efficiency in the European On-road Freight Sector“, CE Delft, Okt. 2012.
- [69] M. Rothaupt, D. Jünemann, und R. Bals, „Energetische Bewertung von 48-V-Systemen in Nutzfahrzeugen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 09/2016, S. S. 54-59.
- [70] Continental AG & Infas, „Continental Mobility Study 2016“.
- [71] Bundesverband der Transportunternehmen e.V., „Situation - Bundesverband der Transportunternehmen (BVT)“. <http://www.bvtev.de/situation.html> (zugegriffen Jan. 27, 2018).
- [72] Goodyear Dunlop Tires Europe B.V., „Die Kraftstoffeffizienz von Nutzfahrzeugen optimieren, Auf dem Weg ins Jahr 2020“.
- [73] A. Huss, H. Mass, und H. Hass, *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context tank-to-wheels (TTW) report, version 4, July 2013*. Luxembourg: Publications Office, 2013.
- [74] J. Schommers, P. Lückert, H. Sass, und C. Andres, „Der Vierzylinder-Dieselmotor OM651 – Einer für alle“, Bd. *ATZ extra*, Sep. 2012.
- [75] R. van Basshuysen, F. Schäfer, und Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr, Hrsg., *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven; mit mehr als 1300 Literaturstellen*, 6., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [76] G. Grüning, „Feine Zahnradwerke, automatisierte Getriebe, Test+Technik“, Nr. *Verkehrsrundschau* 33-34/2011, 2011.
- [77] ZF Friedrichshafen AG, „ZF Friedrichshafen AG, Produktübersicht, Lkw- und Van-Antriebstechnik“. 2015.
- [78] J. Töpler und J. Lehmann, Hrsg., *Wasserstoff und Brennstoffzelle*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [79] H. Tschöke, Hrsg., *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [80] ZVEI-Task Force Spannungsklassen, „Spannungsklassen in der Elektromobilität“. Dez. 2013.
- [81] H.-H. Braess und U. Seiffert, Hrsg., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

- [82] A. Thielmann, A. Sauer, R. Isenmann, M. Wietschel, und P. Plötz, „Produkt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030“, Fraunhofer ISI.
- [83] R. Korthauer, *Handbuch lithium-ionen-batterien*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [84] Akasol, „Robuste und sichere Batteriesysteme für industrielle Anwendungen: Nutzfahrzeuge, Busse, Bahn und Marine, Mobilitec“, gehalten auf der Mobilitec, Hannover.
- [85] Akasol GmbH, „Produktdatenblatt, AKASYSTEM HHP 8M“.
- [86] J. Böcker, „Antriebe für umweltfreundliche Fahrzeuge, Skript zur Vorlesung, Stand vom 27.10.2014, Universität Paderborn, Fachgebiet Leistungselektronik und elektrische Antriebstechnik“. Okt. 2014.
- [87] B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, und S. Ulrich, „Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen“, Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7503.
- [88] A. Vezzini, „Lithium Ionen Batterien – Grundlagen, Eigenschaften und anwendungsspezifische Vorteile“, gehalten auf der Traction Days, Bocholt.
- [89] P. Hofmann, *Hybridfahrzeuge: Ein Alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Dordrecht: Springer, 2010.
- [90] F. Kleiner und H. E. Friedrich, „Maintenance & Repair Cost Calculation and Assessment of Resale Value for Different Alternative Commercial Vehicle Powertrain Technologies“, gehalten auf der EVS30 Symposium, Stuttgart, Okt. 2017.
- [91] J. Liebl, M. Lederer, K. Rohde-Brandenburger, J.-W. Biermann, M. Roth, und H. Schäfer, Hrsg., *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [92] R. Leidhold, „Elektrische Maschinen, Für Elektro- und Hybridfahrzeuge“, Bd. MTZ Wissen, Nr. Ausgabe 09/2012, 2012.
- [93] B. Frieske, „STROM – Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Materialintensitäten der Elektromobilität“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Aug. 2014.
- [94] B. Frieske u. a., „Begleitforschung zu Technologien, Perspektiven und Ökobilanzen der Elektromobilität, STROMbegleitung im Rahmen der Förderbekanntmachung Schlüsseltechnologien für die Elektromobilität (STROM) des BMBF, Abschlussbericht“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, März 2015.
- [95] H. D. Baehr und S. Kabelac, *Thermodynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [96] E. Noreikat, „Brennstoffzelle, Einführung und Grundlagen“, Bd. MTZ Wissen, Nr. Ausgabe 03/2013, 2013.

- [97] B. Gerl, *Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen*. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2002.
- [98] D. Stolten und World Hydrogen Energy Conference, Hrsg., *Hydrogen and fuel cells: fundamentals, technologies and applications; contributions to the 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Essen, 2*. Reprint. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
- [99] W. Vielstich, A. Lamm, und H. A. Gasteiger, Hrsg., *Handbook of fuel cells: fundamentals, technology, and applications*. Chichester, England; Hoboken, N.J.: Wiley, 2003.
- [100] J. C. Wilhelm, *Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems*. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2010.
- [101] T. Frank, „Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens -“, Daimler AG, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., FAT-Schriftreihe.
- [102] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO), Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die durch Artikel 7 der Verordnung vom 16. April 2014 (BGBl. I S. 348) geändert worden ist*. 2012.
- [103] N. Hill u. a., „Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles' energy efficiency and overall CO2 emissions“, Ricardo-AEA Ltd.
- [104] Initiative Massiver Leichtbau, „Phase II Leichtes Nutzfahrzeug (LNfz) 2015-2016“, Apr. 01, 2016, [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.massiverleichtbau.de/downloads/ergebnisse-der-initiative-phase-ii-leichtes-nutzfahrzeug/>.
- [105] *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)*. 2012.
- [106] M. Hillebrand, „Entwicklung eines softwaregestützten Bewertungsmodells zur Evaluation alternativer Nutzfahrzeugkonzepte“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Universität Paderborn, Masterarbeit, Okt. 2013.
- [107] H. Seeger, „Transportaufgabe und Transportprozess“, in *Basiswissen Transportation-Design*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 8–22.
- [108] „Kraftfahrt-Bundesamt - Glossar - E“. Zugriffen: Jan. 28, 2018. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.kba.de/DE/Service/Glossar/Functions/glossar.html?cms_lv2=687574.
- [109] L.-E. Schulte, S. Nentwig, A. Kies, M. Rexeis, und S. Hausberger, „Begrenzung der CO2-Emissionen aus Nutzfahrzeugen“, TÜV Nord, TU Graz, Dessau-Roßlau, Okt. 2013.
- [110] T. Lemmke, „Bewertung und Validierung eines Technologieportfolios effizienzverbessernder Maßnahmen für zukünftige Fahrzeugkonzepte“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Universität Stuttgart, Stuttgart, Studienarbeit, Nov. 2015.

- [111] M. Tutuianu u. a., „Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)“, Technical Report, Dez. 2013. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf>.
- [112] P. Mock u. a., „From Laboratory to Road, A 2014 update of official and ‚real-world‘ fuel consumption and CO₂ values for passenger cars in Europe“, ICCT, TNO, UFEU, KISU, Sidekick Project Support.
- [113] International Council on Clean Transportation, „World-Harmonized Light-Duty vehicles Test Procedure (WLTP)“, Nov. 2013.
- [114] „Emission Test Cycles: WLTC“. <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php> (zugegriffen Jan. 28, 2018).
- [115] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 18. Juni 2009, über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG*.
- [116] „Emission Test Cycles: World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)“. <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php> (zugegriffen Jan. 28, 2018).
- [117] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI-Richtlinie 2235: Wirtschaftliche Entscheidung beim Konstruieren, Methoden und Hilfen“. Beuth Verlag GmbH, Okt. 1987.
- [118] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI-Richtlinie 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)“. Beuth Verlag GmbH, Dez. 2005.
- [119] K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, und U. Lindemann, *Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung; mit 143 Tabellen*, 6., überarb. und korrigierte Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [120] M. A. Weissenberger-Eibl und J. Koch, „Gesamtkostenrechnung TCO, Abschlussdokumentation“, Fraunhofer ISI.
- [121] *Umsatzsteuergesetz (UStG)*. 1979.
- [122] A. Rogozhin, M. Gallaher, und W. McManus, „Automobile Industry Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers“, Feb. 2009.
- [123] M. Chan, R. Schubert, und K. Law, „Commercial medium-and heavy-duty truck fuel efficiency technology cost study“, NHTSA, Washington, Juni 2015.
- [124] „Gebrauchtwagen und Neuwagen bei AutoScout24“. <https://www.autoscout24.de/> (zugegriffen Jan. 28, 2018).

- [125] „mobile.de – Gebrauchtwagen und Neuwagen – Deutschlands größter Fahrzeugmarkt“. <https://www.mobile.de/> (zugegriffen Jan. 28, 2018).
- [126] H.-P. Kienzler, „Studie über wirtschaftliche und ökologische Vorteile von nutzllastoptimierten Fahrzeugen im Lkw-Verkehr“, März 2012.
- [127] A. Meyer, „Fachausschuss Technik der deutschen Feuerwehren“, März 20, 2012.
- [128] E. D. Oezdemir, „The Future Role of Alternative Powertrains and Fuels in the German Transport Sector, A model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport“, Universität Stuttgart, 2011.
- [129] P. Kleiner, „Produktionskostenanalyse von Erdgas- und Wasserstoffspeichersystemen für automobile Anwendungen“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Hochschule Bremen, Masterarbeit, Aug. 2015.
- [130] P. Mock, „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)“, 2010.
- [131] A. G. Coenenberg, T. M. Fischer, und T. Günther, *Kostenrechnung und Kostenanalyse*, 8., überarb. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2012.
- [132] F. Braun, „Kostenentwicklung von Traktions-Elektromotoren und Leistungselektronik“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Fachhochschule Köln, Bachelorarbeit, Mai 2012.
- [133] M. Kroll, „Kostenentwicklung von Traktionsbatterien“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Technische Universität Freiberg, Diplomarbeit, Okt. 2011.
- [134] M. Keller, „Analyse der Kostenentwicklung von mobilen Brennstoffzellensystemen“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Hochschule Landshut, Masterarbeit, 2014.
- [135] B. D. James, J. M. Moton, und Colella, „Hydrogen Storage Cost Analysis“, gehalten auf der U.S. Department of Energy’s (DOE’s) 2013 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting (AMR) for the Hydrogen and Fuel Cell Technologies (FCT) Program, Mai 2013.
- [136] *Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG)*, Neugefasst durch Bek. v. 26.9.2002 I 3818, zuletzt geändert durch Art. 19 Abs. 8 G v. 23.12.2016 I 3234. 1927.
- [137] S. Safrianova, F. Noembrini, K. Boulouchos, und P. Dietrich, „Techno-Economic Analysis of Low-GHG Emission Light, Medium and Heavy Duty Vehicles“, ETH Zürich.
- [138] *Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG)*, Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen, Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 10.6.2015 I 922. 2011.
- [139] Die Bundesregierung, „Bundesregierung | Artikel | Lkw-Maut wird ausgeweitet“. <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2016/05/2016-05-11-lkw-maut-ausgeweitet.html> (zugegriffen Jan. 28, 2018).

- [140] *Einkommenssteuergesetz (EStG)*, Ausfertigungsdatum: 16.10.1934, Neugefasst durch Bek. v. 8.10.2009 I 3366, 3862, zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 7 G v. 1.4.2015 I 434. 1934.
- [141] A. Eric, „Entwicklung eines Ansatzes zur Bewertung notwendiger Ladeinfrastruktureinheiten für alternative Kraftfahrzeuge“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Universität Stuttgart, Bachelorarbeit, Okt. 2014.
- [142] Deutsches Institut für Normung, „DIN-Norm 31051: Grundlagen der Instandhaltung“. Beuth Verlag GmbH, Sep. 2012.
- [143] B. Propfe, M. Redelbach, D. J. Santini, und H. E. Friedrich, „Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values“, gehalten auf der EVS26, Los Angeles, Mai 2012.
- [144] B. Bertsche, Hrsg., *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin: Springer, 2009.
- [145] Amtsblatt der Europäischen Union, „Regelung Nr. 110 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der besonderen Bauteile von Kraftfahrzeugen, die mit verdichtetem Erdgas (CNG) betrieben werden und von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Einbau der besonderen Bauteile eines genehmigten Typs für den Betrieb des Motors mit verdichtetem Erdgas (CNG)“. Mai 07, 2011.
- [146] B. Propfe, „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“, Universität Stuttgart, 2016.
- [147] BMW AG, „BMW i3 - Features & Specifications - BMW USA“. <https://www.bmwusa.com/vehicles/bmwi/bmw-i3/bmw-i3-features-and-specs.html> (zugegriffen Jan. 28, 2018).
- [148] Nissan, „2017 Nissan LEAF Electric Car Battery“, *Nissan USA*. <https://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/charging-range/battery> (zugegriffen Jan. 28, 2018).
- [149] Toyota, „Toyota Prius, warranty information“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.toyota.com/t3Portal/document/omms-s/T-MMS-15Prius/pdf/2015_Toyota_Prius_WMG.pdf.
- [150] ADAC, „ADAC Autotest VW e-Golf“. Juni 2014, [Online]. Verfügbar unter: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5134_VW_e_Golf/VW_e_Golf.pdf
- [151] M. Redelbach, E. D. Özdemir, und H. E. Friedrich, „Optimizing battery sizes of plug-in hybrid and extended range electric vehicles for different user types“, *Energy Policy*, Bd. 73, S. 158–168, Okt. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.05.052.
- [152] A. Schletz, „Zuverlässigkeitsaspekte in der Leistungselektronik“, gehalten auf der Jahrestagung 2010 – 10 Jahre Leistungselektronik am Fraunhofer IISB, Okt. 2010.
- [153] DAT Deutsche Automobil Treuhand, *DAT Marktspiegel Lkw und Transporter, Winter 2015/2016*. 2015.

- [154] H. Frank, *Fuzzy Methoden in der Wirtschaftsmathematik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
- [155] F. Kleiner und H. E. Friedrich, „Development of a Transport Application based Cost Model for the assessment of future commercial vehicle concepts“, gehalten auf der European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress Geneva, Geneva, Switzerland, März 2017.
- [156] H.-J. Bullinger, M. Richter, P. Nohe, und M. Kröll, „An approach to handle risk aspects by technology assessment“, gehalten auf der 10th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, Research and Applications, Madeira, Juli 2003.
- [157] C.-S. Ernst, „CO₂-Reduktionspotentiale bei Pkw bis 2020“, RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge, Dez. 2012.
- [158] G. Figer, F. Seitz, G. Graf, und H. Schreier, „Nutzfahrzeug-Gasmotoren mit Dieseleffizienz“, *MTZ Wissen*, Nr. Ausgabe 10/2014, 2014.
- [159] A. Kampker und C. Nowacki, *Elektromobilproduktion*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [160] A. Thielmann, A. Sauer, R. Isenmann, und M. Wietschel, „Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, Fraunhofer ISI.
- [161] SAE International, „Surface Vehicle Recommended Practice J3016TM: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles“. Sep. 2016.
- [162] „Agentenbasierte Modellierung“, *Wikipedia*. Dez. 27, 2019, Zugriffen: Juni 26, 2020. [Online]. Verfügbar unter:
https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Agentenbasierte_Modellierung&oldid=195259485.
- [163] R. von Westphalen, Hrsg., *Technikfolgenabschätzung als politische Aufgabe*, 3., gänzl. rev., neu Bearb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 1997.
- [164] „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“.
<http://www.kid2010.de/de/page&id=4&navid=304> (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [165] Kraftfahrt-Bundesamt, „Methodische Erläuterungen zu Statistiken über den Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge“. Jan. 2012, [Online]. Verfügbar unter:
https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_methodische_erlaeuterungen_201201_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=10.
- [166] Kraftfahrt-Bundesamt, „Methodische Erläuterungen zu Statistiken über den Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge“. Juni 2017, [Online]. Verfügbar unter:
https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_methodische_erlaeuterungen_201706_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=8.
- [167] C. Haag, G. Schuh, J. Kreysa, und K. Schmelter, „Technologiebewertung“, in *Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement*, Springer Berlin Heidelberg, 2011.

- [168] Amtsblatt der Europäischen Union, „Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“. Okt. 28, 2014.
- [169] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU“. 2016.
- [170] Amtsblatt der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 510/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 11. Mai 2011, zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue leichte Nutzfahrzeuge im Rahmen des Gesamtkonzepts der Union zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. 2011.
- [171] International Council on Clean Transportation, „Certification of CO₂ Emissions and Fuel Consumption of On-Road Heavy-Duty Vehicles in the European Union“, policy update, Juli 2017.
- [172] „Die günstigsten Diesel, Sprit, Benzinpreise, Tankstellen in Ihrer Stadt“. http://www.clever-tanken.de/tankstelle_liste?spritsorte=13&r=25&lat=48.7784485&lon=9.18001318&ort=70173+Stuttgart (zugegriffen Dez. 13, 2017).
- [173] Bundesministerium der Finanzen, „AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig ‚Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)‘, Fassung vom 26.01.1998, Gültig ab 26.01.1998“. 1998.
- [174] „SIC-Portal: Internetauftritt des Bundeszentralamtes für Steuern - Download-Angebote“. http://www.steuerliches-info-center.de/DE/AufgabenDesBZSt/SteuernImInternVergleich/DownloadAngebote/downloadangebote_node.html (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [175] Deutsche Bundesbank, „Tabellen - Abzinsungszinssätze“. http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Geld_und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_und_Renditen/Abzinsungssaetze/Tabellen/tabellen.html (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [176] Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr in Kilometern“. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [177] M. Krausz, *Methode zur Abschätzung der Ergebnisqualität von modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [178] P. Buchholz, „Modellgestützte Analyse und Optimierung, Vorlesungsskript, Informatik IV, Technische Universität Dortmund“. Juni 20, 2016.

- [179] H. Hautzinger, M. Fuchs, J. Schmidt, und W. Stock, „Laufende Hochrechnung der Kfz-Fahrleistungen auf der Basis von Hauptuntersuchungsdaten, Schlussbericht Band 1, Hochrechnungsverfahren“. Mai 31, 2010.
- [180] „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KID 2010), Erhebung zum motorisierten Wirtschaftsverkehr in Deutschland 2009/2010“, Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung GmbH, Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V., Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Kraftfahrt-Bundesamt, Braunschweig, Schlussbericht, Apr. 2012.
- [181] Gabler Wirtschaftslexikon, „Szenario-Technik“.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/szenario-technik.html> (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [182] S. Seum u. a., „The DLR Transport and the Environment Project - Building competency for a sustainable mobility future“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., DLR-Forschungsbericht, 2015.
- [183] S. Seum, T. Kuhnimhof, und M. Goletz, „Verkehrssystemforschung am DLR - Mobil in Deutschland 2040. Teil 2: Die Szenarien des VEU-Projekts“, *Int. Verkehrswesen* 69 2, S. 78–81.
- [184] A. Dahl u. a., „Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030“, PTV Group, Transport Consulting International, Okt. 2016.
- [185] J. Brokate, E. D. Özdemir, und U. Kugler, „Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Aug. 2013.
- [186] U. Bünger, H. Landinger, W. Weindorf, R. Wurster, J. Zerhusen, und W. Zittel, „Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr“, Ludwig Bölkow Systemtechnik, Abschlussbericht, Mai 2016.
- [187] „Bundesfinanzministerium - Zweites Gesetz zur Änderung des Energiesteuer- und des Stromsteuergesetzes“.
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetze_Verordnungen/2017-09-04-Zweites-Gesetz-zur-Aenderung-des-Energiesteuer-und-des-Stromsteuergesetzes.html (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [188] M. Schlesinger, D. Lindenberger, und C. Lutz, „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, Prognos AG, EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, GWS - Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung, Endbericht, Juni 2014.
- [189] „A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles“, McKinsey & Company, 2011.
- [190] P. Mock, „2020-2030 CO2 standards for new cars and light-commercial vehicles in the European Union“, International Council on Clean Transportation (ICCT) Europe, Okt. 2017.

- [191] Europäische Kommission, „Proposal for post-2020 CO₂ targets for cars and vans“, *Climate Action - European Commission*, Nov. 06, 2017. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/proposal_en (zugegriffen Aug. 14, 2018).
- [192] Europäische Kommission, „Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles“, *Climate Action - European Commission*, Nov. 24, 2016. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en (zugegriffen Aug. 13, 2018).
- [193] „BAFA - Elektromobilität“. http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/elektromobilitaet_node.html (zugegriffen Jan. 29, 2018).
- [194] BMVI, „Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO₂-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs“. Zugriffen: Aug. 14, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile.
- [195] BMVI, „BMVI - Scheuer: Ministerium fördert umweltfreundliche Lkw“. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2018/036-scheuer-umweltfreundliche-lkws.html> (zugegriffen Aug. 14, 2018).
- [196] H. Eichseder und M. Klell, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [197] M. D. Paster u. a., „Hydrogen storage technology options for fuel cell vehicles: Well-to-wheel costs, energy efficiencies, and greenhouse gas emissions“, *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 36, Nr. 22, S. 14534–14551, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.056.
- [198] T. Hua u. a., „Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications“, Argonne National Laboratory, TIAX LLC, Sep. 2010.
- [199] „Introduction, Vehicle Technologies Office Overview, Automotive Battery R&D Overview“, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, FY 2013 Annual Progress Report.
- [200] G. P. Pandit, „Developments in Lithium-Ion Battery Technology in The Peoples Republic of China“, Argonne National Laboratory, Jan. 2008.
- [201] Statistisches Bundesamt, „Gesamtwirtschaft & Umwelt - Verbraucherpreisindizes - Statistisches Bundesamt (Destatis)“. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/Verbraucherpreisindizes/Verbraucherpreisindizes.html;jsessionid=C8BFB999C4C10A23C5796EED5D8ED710.cae4> (zugegriffen Jan. 31, 2018).

- [202] OANDA, „Durchschnittliche Wechselkurse | OANDA“.
<https://www.oanda.com/lang/de/currency/average> (zugegriffen Jan. 31, 2018).
- [203] W. Diez, N. Schreier, und A. Haag, „Entwicklung der Beschäftigung im After Sales, Effekte aus der Elektromobilität“, e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Institut für Automobilwirtschaft (IFA) der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt (HfWU) Nürtigen-Geislingen, Center of Automotive Service Technology (CAST) der Hochschule Esslingen, Okt. 2014.
- [204] „ACEA Tax Guide 2012“, European Automobile Manufacturers Association (ACEA), 2012.
- [205] P. Wittenbrink, *Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr: Grundlagen, Optimierungspotenziale, Green Logistics*, 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2011.
- [206] A. Devesa und T. Indinger, „Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen“, FluiDyna GmbH, FAT-Schriftreihe FAT 237, 2011. [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-237.html>.
- [207] A. Süßmann und M. Lienkamp, „Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen“, Technische Universität München, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 103, Mai 2015.
- [208] B. Krubasik u. a., „Global Truck Industry, Perspective towards 2030“, A.T. Kearny, 2014.
- [209] R. Janssen, H. Zwijnenberg, I. Blankers, und J. de Kruijff, „Truck Platooning, driving the future of transportation“, TNO Automotive, Feb. 2015.
- [210] Roland Berger, „Automated Trucks, The next big disruptor in the automotive industry?“, Chicago/ Munich, Apr. 2016, [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.rolandberger.com/en/press/Automated-Trucks-%E2%80%93-The-next-big-disruptor-in-the-automotive-industry.html>.

Anhang

A. Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Fahrzeugklassen

Die folgenden Abbildungen A.1, A.2, A.3 und A.4 zeigen den Verlauf der Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen entsprechend der Fahrzeugklassen von 2005 bis 2014. Ebenfalls ist der prozentuale Neuzulassungsanteil zum Jahr 2014 ausgewiesen.

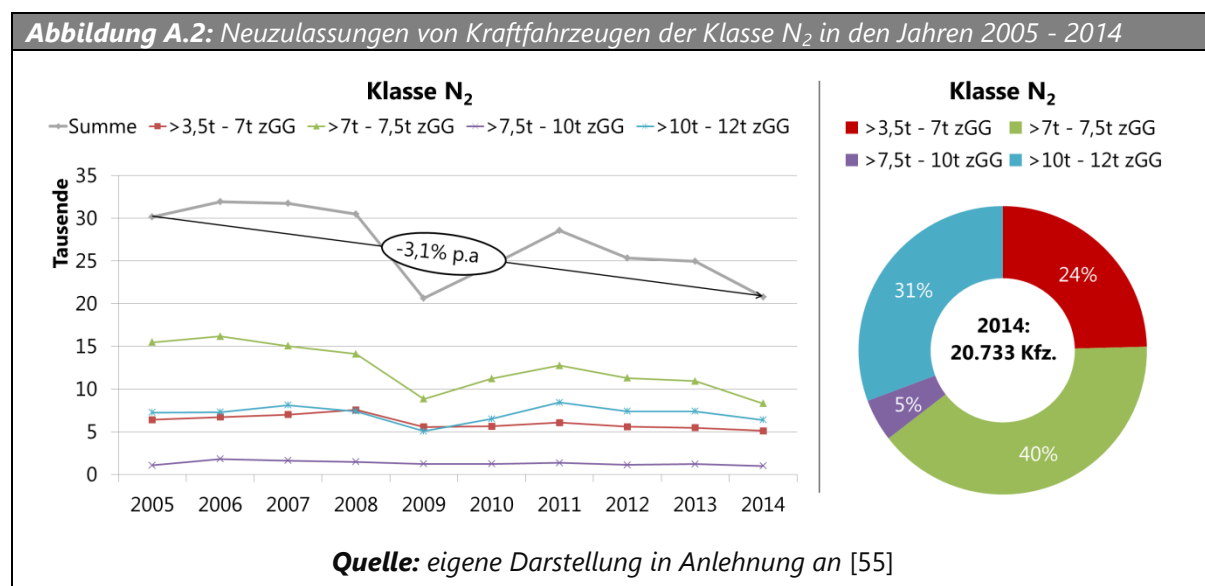
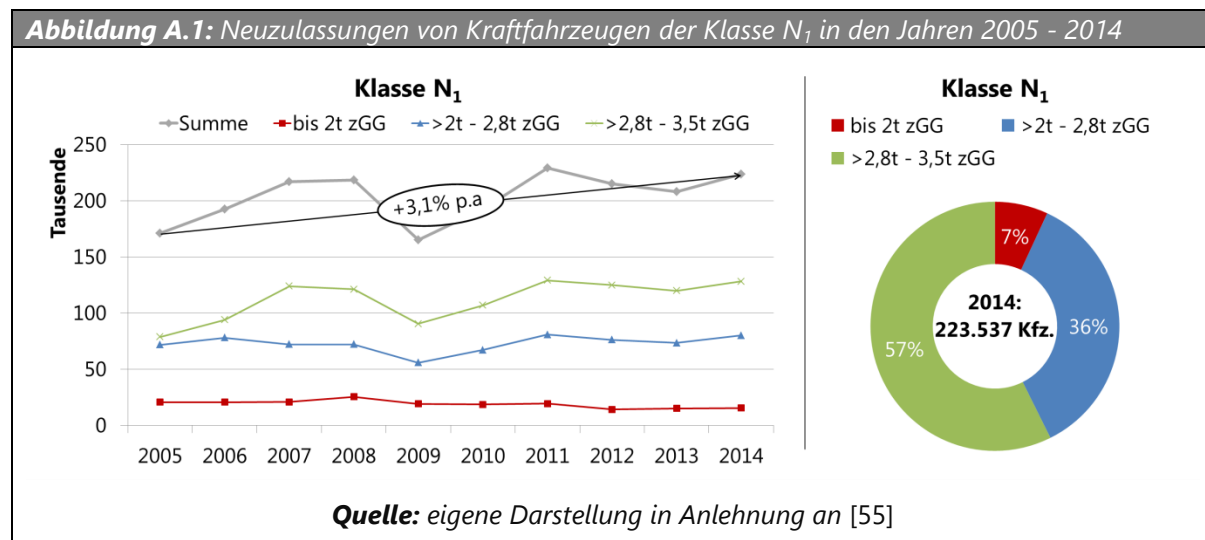
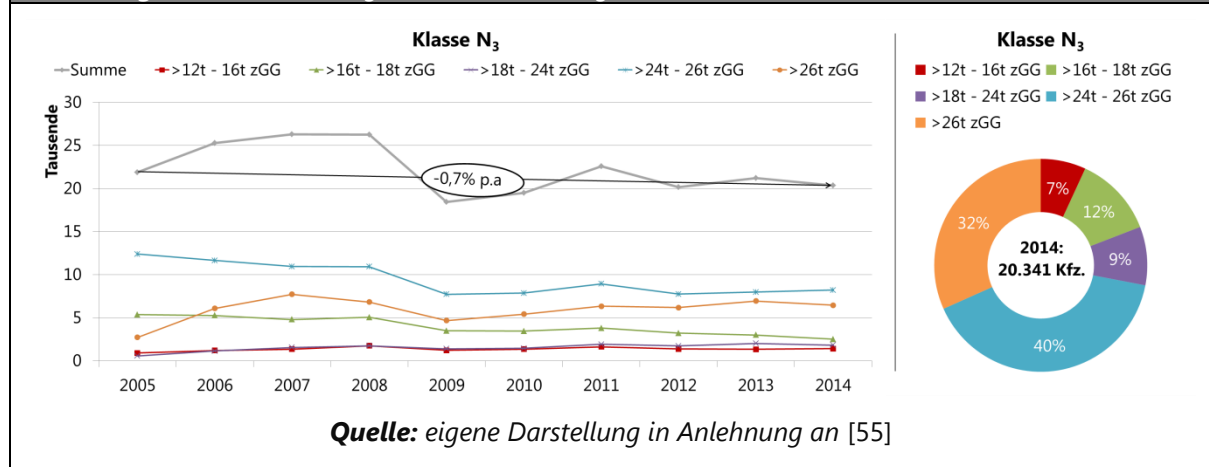
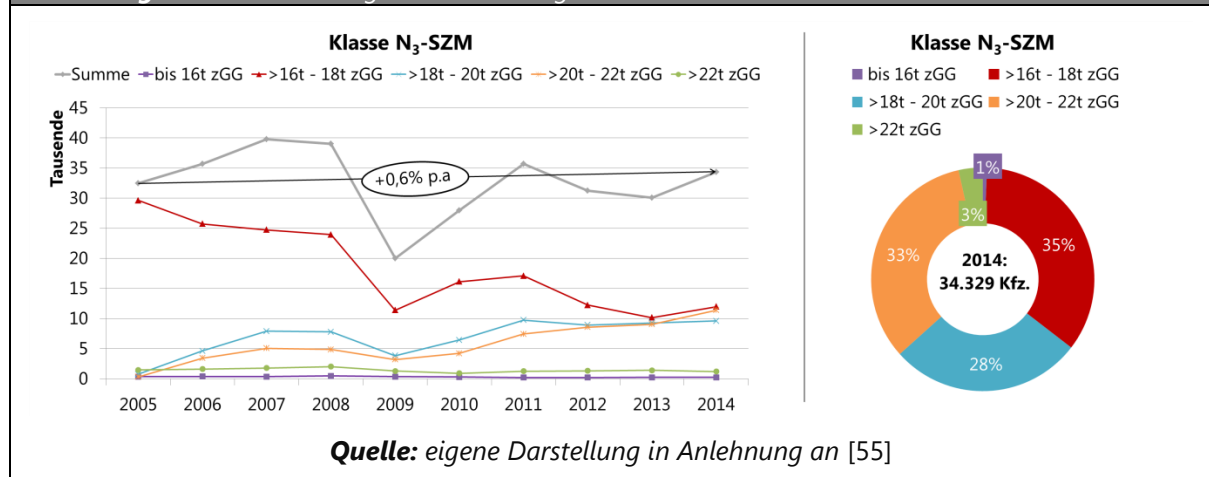


Abbildung A.3: Neuzulassungen von Lastkraftwagen der Klasse N₃ in den Jahren 2005 - 2014**Abbildung A.4:** Neuzulassungen von Sattelzugmaschinen in den Jahren 2005 - 2014

B. Relevante technische Daten und Kennwerte

Tabelle B.1: Technische Daten von Dieselmotoren

Hersteller	Bezeichnung	Bauart	Hubvolumen in cm ³	Leistungsdichte grav. in kW/kg	Leistungsdichte vol. in kW/m ³
≤ 2,998 cm ³ Hubvolumen					
Mercedes	OM607	R4	1.461	0,31	n.v.
Mercedes	OM651	R4	2.148	0,58	n.v.
VW	EA288	R4	1.598	0,38	n.v.
VW	EA288	R4	1.968	0,61	n.v.
Iveco	S23 ENT	R4	2.287	0,34	237
Iveco	S30 ENT	R4	2.998	0,51	401
> 2,998 - 9,290 cm ³ Hubvolumen					
Mercedes	OM934	R4	5.132	0,21	126
Mercedes	OM936	R6	7.698	0,31	155
MAN	D0834	R4	4.580	0,20	111
MAN	D0836	R6	6.871	0,35	234
DAF	Paccar PX-5	R4	4.460	n.v.	n.v.
DAF	Paccar PX-7	R6	6.690	0,34	n.v.
Iveco	N45 ENT	R4	4.485	0,26	194
Iveco	C87 ENT	R6	8.700	0,31	280
Volvo	D5K	R5	5.100	0,29	n.v.
Volvo	D8K	R6	7.700	0,33	n.v.
Scania	DC09	R5	9.290	0,26	183
> 9,290 cm ³ Hubvolumen					
Mercedes	OM470	R6	10.677	0,23	121
Mercedes	OM471	R6	12.809	0,32	180
Mercedes	OM473	R6	15.600	0,35	211
MAN	D2066	R6	10.518	0,20	149
MAN	D2676	R6	12.419	0,30	223
DAF	Paccar MX-11	R6	10.800	0,20	n.v.
DAF	Paccar MX-13	R6	12.902	0,30	n.v.
Iveco	C11 ENT	R6	11.100	0,27	231
Iveco	C13 ENT	R6	12.882	0,30	257
Volvo	D11K	R6	10.800	0,23	n.v.
Volvo	D13K	R6	12.777	0,27	n.v.
Scania	DC13	R6	12.700	0,37	281
≤ 2,998 cm ³ Hubraum					
Min.			1.461	0,31	237
Max.			2.998	0,61	401
Median			2.058	0,44	319
> 2,998 cm ³ Hubraum					
Min.			4.460	0,20	111
Max.			15.600	0,37	281
Median			10.518	0,29	194

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter

Tabelle B.2: Technische Daten von Erdgasmotoren

Hersteller	Bezeichnung	Bauart	Hubvolumen in cm ³	Leistungsdichte grav. in kW/kg	Leistungsdichte vol. in kW/m ³
≤ 2,998 cm ³ Hubraum					
Iveco	S30 ENT G	R4	2.998	0,38	258
> 2,998 cm ³ Hubraum					
MBTech	CoNAG 4C	R4	5.990	n.v.	n.v.
Mercedes	OM936G	R6	7.698	0,32	n.v.
MAN	E0836	R6	6.900	0,33	238
Iveco	N60 ENT G	R6	5.900	0,26	170
Iveco	C78 ENT G	R6	7.800	0,24	216
Volvo	D13C-G	R6	12.800	0,28	n.v.
Scania	OC09	R5	9.300	n.v.	n.v.
≤ 2,998 cm ³ Hubraum					
Min.			2.998	0,38	258
Max.			2.998	0,38	258
Median			2.998	0,38	258
> 2,998 cm ³ Hubraum					
Min.			5.900	0,24	170
Max.			12.800	0,33	238
Median			7.698	0,28	216

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter

Tabelle B.3: Technische Daten von Speichersystemen - Teil 1

Hersteller	Bezeichnung	Material	Speicherdichte vol. in l _{Kraftstoff} /m ³ _{Speicher} bzw. kg _{Kraftstoff} /m ³ _{Speicher}	Massenanteil des Speichers in kg _{Kraftstoff} /kg _{Speicher}
Kraftstofftank (Diesel)				
Literatur	-	n.v.	n.v.	3,1
Literatur	-	n.v.	n.v.	4,2
n.v.	MB LK 300I	Kunststoff	1.000	n.v.
MAN	MAN TGA 990I	Aluminium	905	n.v.
MAN	MAN 150I	Stahl	840	2,8
Scania	Scania 400I	Aluminium	849	8,0
Scania	Scania 200I	Aluminium	861	4,0
Scania	Scania 700I	Aluminium	902	9,8
Scania	Scania 500I	Aluminium	849	7,6
Daimler	MB 100I	Stahl	933	2,5
Daimler	MB 400I	Stahl	893	5,1
Daimler	MB 590I	Stahl	890	5,5
Daimler	MB 600I	Stahl	943	4,6
Daimler	MB 990I	Aluminium	898	13,8
Druckspeicher CNG (200bar bzw. 250bar)				
Literatur	-	n.v.	120	0,303
Cilbras	50.323.200	n.v.	107	0,120
Cilbras	100.323.200	n.v.	116	0,140
Cilbras	140.323.200	n.v.	116	0,156
Everest Kanto	n.v.	n.v.	104	0,116
Everest Kanto	n.v.	n.v.	114	0,137
QUANTUM	274I	Typ IV	107	0,564
QUANTUM	352I	Typ IV	110	0,588
QUANTUM	368I	Typ IV	108	0,576
QUANTUM	534I	Typ IV	111	0,662
QUANTUM	603I	Typ IV	112	0,654
QUANTUM	27.1 DGE - FRM Modul	Typ IV	81	0,327
QUANTUM	30.2 DGE - FRM Modul	Typ IV	83	0,350
QUANTUM	41.2 DGE - FRM Modul	Typ IV	103	0,433
QUANTUM	46.5 DGE - FRM Modul	Typ IV	91	0,402
PROBILT	30 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,151
PROBILT	60 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,228
PROBILT	40 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,238
PROBILT	80 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,259
PROBILT	45 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,253
PROBILT	90 DGE Rail - Modul	n.v.	n.v.	0,260
PROBILT	60 DGE BOC - Modul	n.v.	n.v.	0,214
PROBILT	75 DGE BOC - Modul	n.v.	n.v.	0,195
PROBILT	100 DGE BOC - Modul	n.v.	n.v.	0,194
Flüssigspeicher LNG (1bar)				
Literatur	-	n.v.	263	0,59
Westport	iCE Pack 120	n.v.	n.v.	0,45
Taylor-Wharton	119V	n.v.	n.v.	n.v.
PROBILT	HLNG 72	n.v.	n.v.	0,64
PROBILT	HLNG 100	n.v.	n.v.	0,73
PROBILT	HLNG 119	n.v.	n.v.	0,73
PROBILT	HLNG 150	n.v.	n.v.	0,75
Chart	HLNG 150 "lite"	n.v.	280	0,74
Chart	HLNG 150	n.v.	267	0,72
Chart	HLNG 158 Bonus	n.v.	281	0,72
Chart	HLNG 206	n.v.	274	0,76

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter und [33], [73], [196]–[198]

Tabelle B.4: Technische Daten von Speichersystemen - Teil 2

Hersteller	Bezeichnung	Material	Speicherichte vol. in l _{Kraftstoff} /m ³ Speicher bzw. kg _{Kraftstoff} /m ³ Speicher	Massenanteil des Speichers in kg _{Kraftstoff} /kg _{Speicher}
Druckspeicher H₂ (700bar)				
Literatur	-	n.v.	26,98	0,054
Literatur	-	Typ IV	25,57	0,050
n.v.	n.v.	Typ IV	21,36	0,049
n.v.	n.v.	Typ III	23,84	0,039
Literatur	-	Typ III	25,00	0,035
Literatur	-	Typ IV	26,29	0,050
Druckspeicher H₂ (350bar)				
Literatur	-	n.v.	14,99	0,048
Literatur	-	Typ III	17,18	0,042
Literatur	-	Typ III	17,45	0,042
Literatur	-	Typ IV	17,50	0,055
Dynetek	V 74	n.v.	15,91	0,051
Dynetek	W 205	n.v.	17,13	0,051
AdBlue Tank				
Daimler	40l	Kunststoff	294	n.v.
Scania	75l	Aluminium	448	n.v.
Kraftstofftank (Diesel)				
Min.			840	2,5
Max.			1.000	13,8
Median			895	4,9
Mittelwert			897	5,9
Druckspeicher CNG (200bar bzw. 250bar)				
Min.			81	0,12
Max.			120	0,66
Median			108	0,26
Mittelwert			106	0,31
Flüssigspeicher LNG (1bar)				
Min.			263	0,45
Max.			281	0,76
Median			274	0,72
Mittelwert			273	0,68
Druckspeicher H₂ (700bar)				
Min.			21,36	0,035
Max.			26,98	0,054
Median			25,29	0,049
Mittelwert			24,84	0,046
Druckspeicher H₂ (350bar)				
Min.			14,99	0,042
Max.			17,50	0,055
Median			17,16	0,049
Mittelwert			16,69	0,048
AdBlue Tank				
Min.			294	
Max.			448	
Median			371	

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter und [33], [73], [196]–[198]

Tabelle B.5: Technische Daten von Lithium-Ionen Batteriesystemen

Hersteller	Bezeichnung	Kathodenmaterial	Leistungs- dichte grav. in kW/kg	Leistungs- dichte vol. in kW/m ³	Energie- dichte grav. in kWh/kg	Energie- dichte vol. in kWh/m ³
Hochenergietyp						
Akasol	AKASYSTEM 15M	NMC	0,562	725	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 15M	NMC	0,424	547	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 15M	NMC	0,283	365	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 15M	Nano NMC	0,791	1.064	0,091	122
Akasol	AKASYSTEM 15M	Nano NMC	0,395	532	0,091	122
Akasol	AKASYSTEM 15M	Nano NMC	0,264	355	0,091	122
Akasol	AKASYSTEM 24M	NMC	0,421	531	0,112	141
Akasol	AKASYSTEM 24M	NMC	0,281	354	0,112	141
Akasol	AKASYSTEM 24M	Nano NMC	0,393	516	0,090	119
Akasol	AKASYSTEM 24M	Nano NMC	0,262	344	0,090	119
Akasol	AKASYSTEM 30M	NMC	0,424	547	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 30M	NMC	0,282	365	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 30M	Nano NMC	0,395	532	0,091	122
Akasol	AKASYSTEM 30M	Nano NMC	0,264	355	0,091	122
Akasol	AKASYSTEM 36M	NMC	0,281	354	0,112	141
Akasol	AKASYSTEM 36M	Nano NMC	0,262	344	0,090	119
Akasol	AKASYSTEM 45M	NMC	0,565	730	0,112	145
Akasol	AKASYSTEM 45M	Nano NMC	0,527	710	0,091	122
Enerdel	PE340-394B Vigor+	n.v.	0,157	177	0,079	89
Enerdel	PE350-394A Vigor+	n.v.	0,164	185	0,082	92
Enerdel	PE350-689 Vigor+	n.v.	0,162	145	0,081	72
Enerdel	PE700-394 Vigor+	n.v.	0,265	166	0,133	83
Enerdel	PE320-394A Vigor+	n.v.	0,153	338	0,041	90
Enerdel	PE320-689 Vigor+	n.v.	0,237	228	0,063	61
Enerdel	PE320-689-LP Vigor+	n.v.	0,238	156	0,048	31
FORSEE POWER	NMC System	NMC	0,219	1.298	0,088	519
FORSEE POWER	NMC System	NMC	0,220	1.627	0,088	649
FORSEE POWER	NMC System	NMC	0,220	1.956	0,088	779
FORSEE POWER	NMC System	NMC	0,219	2.267	0,088	909
Literatur	-	n.v.	0,400	n.v.	0,100	200
Literatur	-	n.v.	n.v.	n.v.	0,080	n.v.
Literatur	-	n.v.	n.v.	n.v.	0,075	154
Literatur (JCS)	-	n.v.	0,208	332	0,091	145
Literatur (GAIA)	-	n.v.	0,250	375	0,110	165
Literatur (LitCEL)	-	n.v.	0,912	1504	0,118	194
Literatur (Lamilion)	-	n.v.	0,413	n.v.	0,061	n.v.
Literatur (Kokam)	-	n.v.	0,491	n.v.	0,113	n.v.
Literatur	-	n.v.	n.v.	n.v.	0,080	n.v.
Literatur	-	n.v.	n.v.	n.v.	0,120	n.v.
Literatur	-	n.v.	0,420	683	0,110	179
Hochleistungstyp						
Akasol	AKASYSTEM HHP 8M	NMC	0,42	565	0,04	57
Literatur	-	Eisephosphat	0,93	1.075	0,03	32
Literatur	-	n.v.	0,99	1.900	n.v.	n.v.
Literatur (Saft)	-	NCA	1,11	1.110	0,04	44
Literatur (Matsuhita)	-	NCA	2,09	n.v.	0,07	n.v.
Literatur (Kokam)	-	NCM	1,86	n.v.	0,09	n.v.
Literatur (GAIA)	-	NCA	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Hochenergietyp						
Min.			0,153	145	0,041	31
Max.			0,912	2267	0,133	909
Median			0,281	375	0,091	141
Hochleistungstyp						
Min.			0,423	565	0,028	32
Max.			2,093	1.900	0,093	57
Median			1,050	1.092	0,044	44

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter und [87], [160], [199], [200]

Tabelle B.6: Technische Daten von Invertern und Gleichspannungswandlern

Hersteller	Bezeichnung	Leistungsdichte grav. in kW/kg	Leistungsdichte vol. in kW/m ³
Inverter			
Brusa	DMC514	6,00	6.423
Brusa	DMC524	8,32	6.460
Brusa	DMC534	9,44	5.752
Brusa	DMC544	10,32	5.173
Delphi	n.v.	n.v.	n.v.
UQM	POWERPHASE HD250 Controller	3,75	3.825
UQM	POWERPHASE HD950T Controller	2,50	2.550
UQM	DD45-600L	7,23	6.967
Bidirektionale Gleichspannungswandler			
Brusa	BDC546	4,76	3.427
Brusa	BDF624	4,00	3.037
Brusa	BSC623	0,58	766
Brusa	BSC624	0,58	766
Brusa	BSC614	0,58	766
Brusa	BSC618	0,58	766
Brusa	BSC628	0,58	766
Brusa	BSC648	1,02	896
Brusa	FCS546	3,18	3.273
Brusa	GIC246	2,29	2.726
US Hybrid	BDX2	2,86	n.v.
US Hybrid	BDX4	3,87	n.v.
Inverter und Gleichspannungswandler >11,2 kW			
Min.		2,29	2.550
Max.		10,32	6.967
Median		4,00	3.825

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter

Tabelle B.7: Technische Daten von Drehstrommaschinen

Hersteller	Bezeichnung	Leistungsdichte grav. in kW/kg	Leistungsdichte vol. in kW/m ³
Permanenterregte Synchronmaschine			
UQM	Powerphase HD 250	1,76	5.556
UQM	Powerphase HD 950T	1,18	3.704
UQM	Powerphase HD 200	1,21	3.597
UQM	Powerphase HD 220	1,60	n.v.
Stromerregte Synchronmaschine			
Brusa	SSM1-6.17.10	1,22	2.929
Hybriderregte Synchronmaschine			
Brusa	HSM1-6.17.12	1,36	3.417
Brusa	HSM1-10.18.13	1,82	4.540
Brusa	HSM1-10.18.13-Co	1,67	4.393
Brusa	HSM1-10.18.22	1,91	4.960
Asynchronmaschine			
Brusa	ASM1-6.17.12	0,89	2.441
Siemens	1PV5135-4WS18	0,56	2.496
Siemens	1PV5135-4WS28	0,74	3.344
Siemens	1PV5135-4WS24	0,68	3.045
Siemens	1PV5138-4WS24	0,71	3.535
Siemens	1PV5138-4WS20	0,58	2.911
US Hybrid	EDU200	n.v.	n.v.
US Hybrid	EDU240	0,66	n.v.
Synchronmaschine (PSM)			
Min.		1,18	3.597
Max.		1,76	5.556
Median		1,41	3.704
Asynchronmaschine (ASM)			
Min.		0,56	2.441
Max.		0,89	3.535
Median		0,68	2.978

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter**Tabelle B.8:** Technische Daten von NT-PEM Systemen

Hersteller	Bezeichnung	Nennleistung in kW _{el}	Wirkungsgrad _{el} in %	Leistungsdichte grav. in kW/kg	Leistungsdichte vol. in kW/m ³	Lebensdauer in h
UTC	PureMotion Model 120	120	46	0,13	66	10.000
Hydrogenics	HyPM HD30	33	55 ^a	0,43	n.v.	>10.000
Hydrogenics	HyPM HD90	99	55 ^a	0,28	167	>10.000
Hydrogenics	HyPM HD180	198	55 ^a	0,28	167	>10.000
Ballard	HD6	75	n.v.	0,21	114	>10.000
Ballard	HD6	150	n.v.	0,37	227	>10.000
Proton Motors	HyRange8	8	51	0,04	21	>10.000
Proton Motors	HyRange25	25	50	0,13	71	>10.000
NyCellSys	HY-80	68	50	0,31	309	n.v.
Min.		8	46	0,04	21	
Max.		198	55	0,43	309	
Median		75	51	0,28	140	

Quellen: Herstellerangaben bzw. Produktdatenblätter

Tabelle B.9: Technische Daten von leichten Transporter Kastenwagen mit 3,5 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hubraum in cm ³	Motorleistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leergewicht in kg	zGG in kg	Nutzlast in kg	Ladevolumen in m ³	Tankinhalt in l
Citroen	Jumper 35 2.2 HDi 130	2.198	96	320	1.710	3.500	1.790		
Citroen	Jumper 35 3.0 HDi 180 Heavy	2.999	130	400	2.030	3.500	1.470	17,00	90
Fiat	Ducato 35 2.3 Multijet 130	2.287	96	320	1.710	3.500	1.790		
Fiat	Ducato 35 2.3 Multijet 180 Maxi	2.999	130	400	2.030	3.500	1.470	17,00	90
Ford	Transit 350 2.2 TDCi	2.198	74	310	1.860	3.500	1.640	15,10	
Ford	Transit 350 2.2 TDCi	2.198	114	385	1.780	3.500	1.720		n.v.
Iveco	Daily 35 S11	2.287	78	270	1.740	3.500	1.760	19,60	
Iveco	Daily 35 C21	2.998	150	470	2.290	3.500	1.210		70
Mercedes	Sprinter 310 CDI	2.143	70	250	1.710	3.500	1.790	17,00	75
Mercedes	Sprinter 319 BlueTEC	2.987	140	440	2.000	3.500	1.500		
Nissan	NV400 F35.13. 2.3 dCi 125	2.298	92	310	2.110	3.500	1.390	14,90	n.v.
Nissan	NV400 2.3 dCi 150 Comfort	2.298	110	350	2.400	3.500	1.100		
Opel	Movano 2.3 CDTI	2.299	81	285	1.690	3.500	1.810	17,00	80
Opel	Movano 2.3 BiTurbo CDTI	2.299	120	360	1.840	3.500	1.660		
Peugeot	Boxer 333 2.2 Hdi 130	2.198	96	320	1.710	3.500	1.790	17,00	n.v.
Peugeot	Boxer 435 3.0 Hdi 175	2.999	130	400	2.030	3.500	1.470		
Renault	Master 2.3 dCi 110	2.298	81	285	1.760	3.500	1.740	17,00	105
Renault	Master 2.3 dCi 165	2.298	120	360	1.990	3.500	1.510		
VW	Crafter 35 2.0 TDI	1.968	80	300	1.660	3.500	1.840	17,00	75
VW	Crafter 35 2.0 TDI	1.968	120	400	2.330	3.500	1.170		
Min.		1.968	70	250	1.660	3.500	1.100	14,9	70
Max.		2.999	150	470	2.400	3.500	1.840	19,6	105
Median		2.298	103	335	1.850	3.500	1.650	17,0	80

Quellen: [63] und Herstellerangaben

Tabelle B.10: Technische Daten von leichten Solo-Lastkraftwagen mit Kofferaufbau und 7,5 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hub- raum in cm ³	Motor- leistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leer- gewicht in kg	zGG in kg	Lade- volumen in m ³	Aufbau- gewicht in kg	Leer- inkl. Aufbaugewicht in kg	Nutzlast in kg	Kraftstoff- tank in l	AdBlue- Tank in l
DAF	LF150 FA-8t	4.500	112	580	3.107	7.500			3.962	3.538	110	15
DAF	LF220 FA-8t	6.700	164	850	3.352	7.500			4.207	3.293	110	15
Iveco	Eurocargo 75 E 16/P	4.500	118	580	3.400	7.500			4.255	3.245	120	30
Iveco	Eurocargo 75 E 21/P	4.500	152	750	3.585	7.500	20,54	855	4.440	3.060	120	30
MAN	TGL 7.150 BB	4.580	110	570	3.500	7.500			4.355	3.145	150	10
MAN	TGL 8.220 BB	4.580	162	850	3.670	7.500			4.525	2.975	150	10
Mercedes	Atego 816 L	5.100	115	650	n.v.	7.500			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Mercedes	Atego 823 L	5.100	170	900	n.v.	7.500			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Min.		4.500	110	570	3.107	7.500			3.962	2.975	110	10
Max.		6.700	170	900	3.670	7.500			4.525	3.538	150	30
Median leichte Lastkraftwagen		4.580	135	700	3.450	7.500	20,54	855	4.305	3.195	120	15

Quellen: [63] und Herstellerangaben

Tabelle B.11: Technische Daten von leichten Solo-Lastkraftwagen mit Kofferaufbau und 12 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hub- raum in cm ³	Motor- leistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leer- gewicht in kg	zGG in kg	Lade- volumen in m ³	Aufbau- gewicht in kg	Leer- inkl. Aufbaugewicht in kg	Nutzlast in kg	Kraftstoff- tank in l	AdBlue- Tank in l
DAF	LF180 FA-12t	4.500	135	700	3.352	12.000	37,49	1.400	4.752	7.248	110	15
DAF	LF250 FA-12t	6.700	186	950		12.000						
Iveco	Eurocargo 120 E 19/P	4.500	137	680	4.917	12.000			6.317	5.683	115	25
Iveco	Eurocargo 120 E 28/P	6.700	206	1.000		12.000						
MAN	TGL 12.180 BL	4.580	132	700	4.035	12.000			5.435	6.565	150	10
MAN	TGL 12.250 BB	6.871	184	1.000		12.000						
Mercedes	Atego 1216	5.100	115	650	n.v.	12.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Mercedes	Atego 1230 L	7.700	220	1.200		12.000						
Renault	D12 LOW P4x2 210	5.100	154	800	n.v.	12.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Renault	D12 MED P4x2 280	7.700	206	1.050		12.000						
Volvo	FL 210	5.100	154	800	4.620	12.000			6.020	5.980	n.v.	n.v.
Volvo	FL 280	7.700	206	1.050	4.980	12.000			6.380	5.620	n.v.	n.v.
Min.		4.500	115	650	3.352	12.000	37,49		4.752	5.620	110	10
Max.		7.700	220	1.200	4.980	12.000	37,49		6.380	7.248	150	25
Median		5.900	169	875	4.620	12.000	37,49	1.400	6.020	5.980	115	15

Quellen: [63] und Herstellerangaben

Tabelle B.12: Technische Daten von schweren Solo-Lastkraftwagen mit Kofferaufbau und 18 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hub- raum in cm ³	Motor- leistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leer- gewicht in kg	zGG in kg	Lade- volumen in m ³	Aufbau- gewicht in kg	Leer- inkl. Aufbaugewicht in kg	Nutzlast in kg	Kraftstoff- tank in l	AdBlue- Tank in l
DAF	LF220 FA	6.700	164	850	4.899	18.000			7.779	10.221	170	25
DAF	XF510 FA LD (Low Deck)	12.900	375	2.500	7.901	18.000			10.781	7.219	450	90
Iveco	Eurocargo 180 E 25/P	6.700	185	850	5.550	18.000			8.430	9.570	120	30
Iveco	Stralis AS 190 S 50/P	12.900	368	2.300	7.565	18.000			10.445	7.555	290	50
MAN	TGM 18.250 BL	6.871	184	1.000	4.995	18.000			7.875	10.125	220	10
MAN	TGX 18.480 BL	12.419	353	2.300	7.745	18.000			10.625	7.375	400	60
Mercedes	Antos 1824 L	7.700	175	1.000	n.v.	18.000	50,40	2.880	n.v.	n.v.	180	n.v.
Mercedes	Actros1863 L	15.600	460	3.000	8.599	18.000			11.479	6.521	390	60
Renault	D 18 WIDE P4x2 250	7.700	184	950	n.v.	18.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Renault	T 520 P4x2	12.800	382	2.550	n.v.	18.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Scania	P/G 250	9.300	184	1.250	8.260	18.000			11.140	6.860	450	55
Scania	P/G 320	9.300	235	1.600	8.260	18.000			11.140	6.860	450	55
Volvo	FE 250	7.700	184	950	5.215	18.000			8.095	9.905	200	20
Volvo	FH 500	12.800	368	2.500	8.365	18.000			11.245	6.755	330	64
Min.		6.700	164	850	4.899	18.000	50,40		7.779	6.521	120	10
Max.		15.600	460	3.000	8.599	18.000	50,40		11.479	10.221	450	90
Median		9.300	210	1.425	7.745	18.000	50,40	2.880	10.625	7.375	310	55

Quellen: [63] und Herstellerangaben

Tabelle B.13: Technische Daten von Solo-Lastkraftwagen oder Lastkraftwagen für Anhängerbetrieb ab 20 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hub- raum in cm ³	Motor- leistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leer- gewicht in kg	zGG in kg	Lade- volumen in m ³	Aufbau- gewicht in kg	Leer- inkl. Aufbaugewicht in kg	Nutzlast in kg	Kraftstoff- tank in l	AdBlue- Tank in l
DAF	CF400 FA	10.800	291	1.900	6.664	20.500			9.544	10.956	390	50
DAF	XF510 FAR LD (Low Deck)	12.900	375	2.500	9.001	26.000			11.881	14.119	450	90
Iveco	Stralis AD 260 S 31 Y/P	8.700	228	1.300	7.500	26.000			10.380	15.620	290	50
Iveco	Stralis AS 260 S 56 Y/FP	12.900	412	2.500	8.405	26.000			11.285	14.715	290	55
MAN	TGM 26.290 BL	6.871	206	1.150	6.770	26.000			9.650	16.350	300	20
MAN	TGX 26.480 BL	12.400	354	2.300	8.705	26.000			11.585	14.415	400	60
Mercedes	Antos 2427 L	7.700	200	1.100	6.500	24.000	50,40	2.880	9.380	14.620	390	60
Mercedes	Actros 2563 L	15.600	460	3.000	8.599	26.000			11.479	14.521	390	60
Renault	D 25 WIDE P6x2 LOW 250	7.700	184	950	n.v.	25.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Renault	T 520 P6x2	12.800	382	2.550	n.v.	25.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Scania	P 250	9.300	184	1.250	8.830	25.000			11.710	13.290	450	55
Scania	P 280	9.300	235	1.600	8.830	25.000			11.710	13.290	450	55
Volvo	FE 250	7.700	184	950	6.735	26.000			9.615	16.385	400	n.v.
Volvo	FH 500	12.800	368	2.500	8.510	26.000			11.390	14.610	330	64
Min.		6.871	184	950	6.500	20.500	50,40		9.380	10.956	290	20
Max.		15.600	460	3.000	9.001	26.000	50,40		11.881	16.385	450	90
Median		10.050	263	1.750	8.458	26.000	50,40	2.880	11.338	14.566	390	55

Quellen: [63] und Herstellerangaben

Tabelle B.14: Technische Daten von Sattelzugmaschinen für Aufliegebetrieb mit 40 t zGG

Hersteller	Fahrzeug	Hub- raum in cm ³	Motor- leistung in kW	Motordreh- moment max. in Nm	Leer- gewicht in kg	zGG in kg	Lade- volumen in m ³	Aufbau- gewicht in kg	Leer- inkl. Aufbaugewicht in kg	Nutzlast in kg	Kraftstoff- tank in l	AdBlue- Tank in l
DAF	CF 400 FT	10.800	291	1.900	6.848	40.000			13.830	26.170	430	45
DAF	XF 105 FTG	12.900	375	2.500	8.092	40.000			15.074	24.926	430	n.v.
Iveco	Stralis AD 440 S 33 T/P	8.700	294	1.700	6.570	40.000			13.552	26.448	290	50
Iveco	Stralis AS 440 S 56 TX/P	12.900	412	2.500	7.170	40.000			14.152	25.848	290	50
MAN	TGS 18.400 BLS	10.518	294	1.900	7.000	40.000			13.982	26.018	400	60
MAN	TGX 18.560 BLS	15.200	412	2.700	8.565	40.000			15.547	24.453	450	24
Mercedes	Antos 1840 LS	10.700	290	1.900	n.v.	40.000	90,00	6.982	n.v.	n.v.	390	60
Mercedes	Actros 2563 LS	15.600	460	3.000	8.095	40.000			15.077	24.923	1.420	90
Renault	T 380	10.800	280	1.800	n.v.	40.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Renault	T 520	12.800	382	2.550	n.v.	40.000			n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Scania	P 360 LA	9.300	265	1.700	6.435	40.000			13.417	26.583	300	80
Scania	R 730 LA	16.400	537	3.500	8.359	40.000			15.341	24.659	300	75
Volvo	FM 370 D11	10.800	272	1.750	6.575	40.000			13.557	26.443	160	32
Volvo	FH 62 TT3HA	12.800	405	2.652	8.510	40.000			15.492	24.508	810	100
Min.		8.700	265	1.700	6.435	40.000	90,00		13.417	24.453	160	24
Max.		16.400	537	3.500	8.565	40.000	90,00		15.547	26.583	1.420	100
Median		11.800	335	2.200	7.170	40.000	90,00	6.982	14.152	25.848	395	60

Quellen: [63] und Herstellerangaben

C. Inflationsraten und Wechselkurse

Tabelle C.1: Historischer Verlauf der Inflationsraten in Deutschland vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2014

Jahr	Inflationsrate in %
2000	1,4
2001	2,0
2002	1,4
2003	1,1
2004	1,6
2005	1,6
2006	1,5
2007	2,3
2008	2,6
2009	0,3
2010	1,1
2011	2,1
2012	2,0
2013	1,5
2014	0,9

Quelle: [201]

Tabelle C.2: Historische Wechselkurse im Jahresmittel vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2014

Jahr	USD zu EUR	GBP zu EUR
2000	1,08	1,64
2001	1,12	1,61
2002	1,06	1,59
2003	0,88	1,45
2004	0,80	1,47
2005	0,80	1,46
2006	0,80	1,47
2007	0,73	1,46
2008	0,68	1,26
2009	0,72	1,12
2010	0,75	1,17
2011	0,72	1,15
2012	0,78	1,23
2013	0,75	1,18
2014	0,75	1,24

Quelle: [202]

D. Wartungsmaßnahmen und berücksichtigte Komponenten bzgl. der Instandsetzung

Tabelle D.1: Berücksichtigte Wartungsmaßnahmen – Teil 1	
Komponente	Maßnahme
Hubkolbenmotor	
Starterbatterie	Funktionsprüfung und Kontaktfett
Lichtmaschine	Kohlenbürsten austauschen
Anlasser	Kohlenbürsten austauschen
Zylinderkopf	Dichtung ersetzen
Keilriemen	ersetzen
Zahnriemen	ersetzen
Luftfilter	ersetzen
Kraftstofffilter	ersetzen
ÖlfILTER	ersetzen
Motoröl	ersetzen
Kühlmittel	prüfen und auffüllen
Ventile	Ventilspiel prüfen und einstellen
Zündkerzen	ersetzen
Abgassystem	
Abgasanlage	Sichtprüfung bzgl. Oxidation
SCR-Anlage	prüfen und auffüllen
Triebstrang	
Getriebeöl	ersetzen
Kupplung	einstellen
Bremssystem	
Bremsbeläge	Sichtprüfung
Bremsscheiben	Sichtprüfung
Bremsschläuche	Sichtprüfung
Bremsflüssigkeit	ersetzen
ALB (Bremskraftregler)	Sichtprüfung
Druckluftsystem	
Kompressor	Sichtprüfung
Lufttrocknerpatrone	ersetzen
Druckluftbehälter	Sichtprüfung
Druckluftleitung & ggfl. Kupplung	Sichtprüfung
Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [143], [203], Expertengespräche	

Tabelle D.2: Berücksichtigte Wartungsmaßnahmen – Teil 2	
Komponente	Maßnahme
Fahrwerk	
Stoßdämpfer	Sichtprüfung
Feder	Sichtprüfung
Radlager	Sichtprüfung
Gelenke	Sichtprüfung
Luftbalg	Sichtprüfung
Erdgassystem	
Tanksystem	Sichtprüfung
Elektrifizierung	
Hochvoltbatterie	Funktions- und Sichtprüfung
Elektromotor/Generator	Sichtprüfung
Leistungselektronik	Sichtprüfung
Kühlmittel	prüfen und auffüllen
Trocknerpatrone	ersetzen
Wasserstoffsystem	
Luftfilter (Kathode)	ersetzen
Wasserstoff Sensorik	Funktionsprüfung
Entlüftungsöffnung	Sichtprüfung
Abblasklappe	Sichtprüfung
Ionentauscher	ersetzen
Kühlmittel	prüfen und auffüllen
Tanksystem	Sichtprüfung
Sonstiges	
Hydrauliköl (Lenkung)	prüfen und auffüllen
Reifen	Verschleiß und Luftdruck prüfen
Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [143], [203], Expertengespräche	

Tabelle D.3: Berücksichtigte Komponenten bzgl. der Instandsetzung	
Komponente	Maßnahme
Hubkolbenmotor	
Starterbatterie	ersetzen
Wasserpumpe/Wasserkühler	ersetzen
Turbolader	ersetzen
Abgassystem	
Abgasanlage	ersetzen
Partikelfilter	ersetzen
SCR-Anlage	ersetzen
Triebstrang	
Getriebe	ersetzen
Kupplung	ersetzen
Antriebswelle	ersetzen
Bremssystem	
Bremsbeläge	ersetzen
Bremsscheiben	ersetzen
Druckluftsystem	
Kompressor	ersetzen
Druckluftbehälter	ersetzen
Druckleitung & ggfl. Kupplungen	ersetzen
Fahrwerk	
Stoßdämpfer	ersetzen
Radlager	ersetzen
Luftbalg	ersetzen
Erdgassystem	
Tanksystem	ersetzen
Elektrifizierung	
Hochvoltbatterie	ersetzen
Elektromotor/Generator	ersetzen
Leistungselektronik	ersetzen
Wasserstoffsystem	
Brennstoffzellensystem	ersetzen
Tanksystem	ersetzen
sonstiges	
Reifen	ersetzen
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [143], [203]	

Tabelle D.4: Anfallende Kosten und Intervalle von Hauptuntersuchung, Sicherheitsprüfung, Abgasuntersuchung und Druckgasspeichersystemen

	Hauptuntersuchung (HU)		Sicherheitsprüfung (SP)		Abgasuntersuchung (AU)			Dichtheitsprüfung		Druckprüfung	
	alle Antriebstechnologien		alle Antriebstechnologien		Diesel inkl. OBD	Benzin inkl. OBD					
Fahrzeug- sgment	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀	Intervall in Monaten	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀	Intervall in Monaten	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀	Intervall in Monaten	Intervall in Monaten	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀	Intervall in Monaten	Kostensatz in EUR ₂₀₁₀
3,5t zGG	34,23	24	-	-	30,92	11,81	24	24	200	60	300
7,5t zGG	51,37	12	-	-			12				
12t zGG	64,58		50,32								
18t zGG	74,37		58,91	6							
26t zGG	91,70		74,85								

Quelle: eigene Darstellung nach [102], [204]

E. Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten von Einzeltechnologien und Maßnahmen zur Reduktion des Streckenverbrauchs

Tabelle E.1: Überblick zukünftiger Technologien bzw. Maßnahmen inkl. der Bandbreite angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten bzgl. des Dieselmotors

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Reduktionspotential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
			Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Dieselmotor	Aufladung	Einstufiger ATL mit verbesserter Effizienz	0,3	2,3	1,9	n.v.	n.v.	n.v.
		Einstufiger ATL und eBooster (Ladedruckerhöhung)	1,1	3,6	2,4	n.v.	n.v.	n.v.
		Zweistufiger ATL (Zwischenkühlung)	1,0	5,0	2,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Einstufiger ATL und Impulsaufladung (Lufttaktventil)	20,0	20,0	20,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Ladungswechsel	Vollvariable Ventilsteuerung (Hub, Miller- oder Atkinson-Verfahren)	1,0	10,0	1,3	250	692	441
		Absenkung des Abgasgegendruckniveaus	0,1	0,4	0,3	473	519	496
	Verbrennung	Niedertemperatur-Verbrennung (DCCS)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Niedertemperatur-Verbrennung (HPLI)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Niedertemperatur-Verbrennung (HCCI)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Niedertemperatur-Verbrennung (HCLI)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Verringerung der Zündverzugszeit	1,0	1,9	1,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Erhöhung des Spitzendrucks	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Gemischbildung	Erhöhung des Einspritzdrucks	1,0	4,0	1,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Optimierte Mehrfacheinspritzung	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Vergrößerung des Luftverhältnisses	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Optimierte AGR-Rate	3,0	3,0	3,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Niedertemperatur AGR	1,0	1,0	1,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Tribologie	Niederviskoses Öl	1,0	5,8	2,0	67	77	71
		Öltemperaturkontrolle	3,1	5,8	4,5	n.v.	n.v.	n.v.
		NANOSLIDE-Beschichtung (Lichtbogen-Drahtspritzen)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Reibungsoptimierung der Steuerorgane (Nockenwelle, Ventile, etc.)	0,5	2,0	0,8	43	43	43
		Verwendung von Stahlkolben anstatt Aluminiumkolben	2,0	5,0	3,5	n.v.	n.v.	n.v.
	Thermomanagement	Kühlungs-, Kraftstoff- und Schmiermittelloptimierung	5,0	10,0	7,5	n.v.	n.v.	n.v.
	Abgasnachbehandlung	Optimierung der SCR Umsetzungsrate	2,0	4,0	3,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Abgaswärmehückgewinnung	Organic Rankine Cycle (ORC)	1,5	7,5	4,8	7.104	11.000	10.611
		Joule- bzw. Brayton-Kreisprozess	1,5	10,0	5,0	7.104	12.981	9.790
		Turbocompound (mechanisch)	0,5	10,0	3,0	1.526	3.130	1.970
		Turbocompound (elektrisch)	0,9	10,0	3,0	2.000	7.853	4.209
		Thermoelektrischer Generator	2,0	2,3	2,0	1.279	1.279	1.279
	Motorsteuerung & -regelung	Sensorbasiert (closed-loop)	1,0	4,0	1,8	192	192	192
		Modellbasiert (closed-loop)	1,0	4,0	2,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Zylinderabschaltung	4,0	4,0	4,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Nebenaggregate	Optimierte Betriebsstrategie (bedarfsgerecht)	0,3	4,0	1,3	75	460	268
		Elektrifizierung	0,4	11,0	3,1	589	589	589

Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [13], [17]–[23], [25], [26], [28], [31], [75], [123], [205]

Tabelle E.2: Überblick zukünftiger Technologien bzw. Maßnahmen inkl. der Bandbreite angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten bzgl. des Erdgasmotors

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Reduktionspotential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
			Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Erdgasmotor	Aufladung	Einstufiger ATL mit verbesserter Effizienz	0,3	2,0	1,2	n.v.	n.v.	n.v.
		Einstufiger ATL und eBooster (Ladedruckerhöhung)	1,1	3,6	2,4	n.v.	n.v.	n.v.
		Zweistufiger ATL (Zwischenkühlung)	2,0	5,0	3,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Einstufiger ATL und Impulsaufladung (Lufttaktventil)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Ladungswechsel	Variable Ventilsteuerung (Hub)	1,0	12,0	9,0	227	302	265
		Variable Ventilsteuerung (Miller-Verfahren oder Atkinson-Verfahren)	1,0	12,0	9,0	92	92	92
		Absenkung des Abgasgegendruckniveaus	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Verbrennung	Strahlgeführt - Magerkonzept	9,0	14,0	9,8	457	565	511
		Luft- oder Wandgeführt - stöchiometrisches Konzept	2,0	5,5	3,5	143	386	265
		Niedertemperatur-Verbrennung (HCCI)	10,0	15,0	11,5	381	516	449
	Zündung	Hochfrequenzzündung, Plasmazündung und Mehrfachfunkenzündung	10,0	10,0	10,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Gemischbildung	Direkteinspritzung - stöchiometrisches Konzept	2,0	5,5	3,5	143	386	265
		Direkteinspritzung - Magerkonzept	9,0	15,0	10,0	457	565	511
		Erhöhung des Einspritzdrucks	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Optimierte Mehrfacheinspritzung	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Abgasrückführung (AGR)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Optimierte AGR-Rate	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Niedertemperatur AGR	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Dual-Fuel	10,0	20,0	15,0	25.367	25.367	25.367
		Variable Verdichtung	7,0	20,0	8,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Niederviskoses Öl	0,5	10,0	3,0	83	377	230
	Tribologie	Öltemperaturkontrolle	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Reibungsoptimierung der Steuerorgane (Nockenwelle, Ventile, etc.)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Thermomanagement	NANOSLIDE-Beschichtung (Lichtbogen-Drahtspritzen)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Kühlungs-, Kraftstoff- und Schmiermitteloptimierung	5,0	10,0	7,5	n.v.	n.v.	n.v.
	Abgasnachbehandlung	Partikelfilter	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		NO _x -Adsorber	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Selektive Methanoxidation	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Optimierter 3-Wege-Katalysator	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Abgaswärmerückgewinnung	Organic Rankine Cycle (ORC)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Joule- bzw. Brayton-Kreisprozess	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Turbocompound (mechanisch)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Turbocompound (elektrisch)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Thermoelektrischer Generator	6,0	6,0	6,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Motorsteuerung & -regelung	Sensorbasiert (closed-loop)	1,0	4,0	2,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Modellbasiert (closed-loop)	1,0	4,0	2,5	n.v.	n.v.	n.v.
		Zylinderabschaltung	2,5	20,0	4,5	n.v.	n.v.	n.v.
	Nebenaggregate	Optimierte Betriebsstrategie (variable Regelung/ Drehzahlpassung)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Elektrifizierung	0,3	4,0	2,0	377	377	377

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [13], [17], [18], [20], [22], [31], [75]

Tabelle E.3: Überblick zukünftiger Technologien bzw. Maßnahmen inkl. der Bandbreite angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten bzgl. Getriebe und Endantrieb

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Reduktionspotential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
			Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Getriebe	Bauart & -form	Automatisiertes Getriebe (AMT)	1,5	10,0	3,3	264	4.474	1.781
		Doppelkupplungsgetriebe (DSG)	2,6	8,0	5,0	655	655	655
		Stufenloses Getriebe (CVT)	3,0	3,0	3,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Automatikgetriebe (AT)	5,0	5,0	5,0	11.292	11.292	11.292
		Steigerung der Gangzahl - AMT	2,7	4,1	3,4	826	826	826
	Getriebesteuerung & -regelung	Verbesserte Schaltlogik (AMT)	1,5	2,5	2,0	46	46	46
		Elektronisch gesteuertes CVT (e-CVT)	3,5	7,7	5,6	n.v.	n.v.	n.v.
	Tribologie	Reibungsoptimierung	0,4	2,0	1,0	192	192	192
		Niederviskoses Öl	1,0	1,0	1,0	27	27	27
	Übersetzung	Downspeeding	1,0	4,0	2,6	50	50	50
Endantrieb	Tribologie	Reibungsoptimierung	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.

Quelle: eigene Darstellung nach [13], [17], [18], [20]–[23], [31], [205]

Tabelle E.4: Überblick aerodynamischer Technologien bzw. Maßnahmen inklusive der Bandbreiten angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Investitionskosten

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Δc_w	Δm	Reduktions- potential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
					Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Aerodynamik	Fahrerhaus	Crash nose	n.v.	n.v.	0,7	8,6	1,3	n.v.	n.v.	n.v.
		Kameras	-0,02	vern.	0,7	0,7	0,7	4.900	4.900	4.900
		Deturbulatorfolie	n.v.	vern.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	Fahrwerk	Unterbodenvollverkleidung	-0,02	n.v.	0,8	0,8	0,8	n.v.	n.v.	n.v.
		Felgenabdeckung	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Perforierter Schmutzfänger	n.v.	vern.	1,0	3,5	3,5	13	14	13
		Fahrgestellabdeckung	-0,02	n.v.	0,6	1,4	1,0	n.v.	n.v.	n.v.
	Auflieger/ Aufbau	Felgenabdeckung	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Trennplatte	-0,04	n.v.	2,1	2,1	2,1	n.v.	n.v.	n.v.
		Wirbelfalle	n.v.	n.v.	0,6	5,7	1,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Aufliegerfrontverkleidung	-0,12	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Auflieger-Fahrgestellabdeckung	n.v.	n.v.	0,4	0,4	0,4	n.v.	n.v.	n.v.
		Seitenverkleidung (Auflieger)	-0,05	+200 kg	0,4	4,3	1,0	1.152	5.000	4.250
		Vollverkleidung	n.v.	n.v.	0,9	5,4	3,0	2.306	2.306	2.306
		Heckenzug	-0,03	+50 kg	0,8	6,9	1,7	384	2.300	871
		Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)	-0,04	n.v.	1,5	8,0	3,0	1.345	1.345	1.345
		Umlenkschaukeln	-0,02	vern.	0,6	4,3	4,0	700	700	700
		Magnus Rotor	n.v.	n.v.	5,7	5,7	5,7	n.v.	n.v.	n.v.
		Dacheinzug	-0,02	n.v.	0,3	4,5	2,0	0	0	0
		Teardrop-Design	n.v.	n.v.	5,0	18,0	10,0	3.560	3.560	3.560
	Fahrzeugübergreifend	Kastenwagenoptimierung Stufe 1	-0,04	-	2,0	5,0	3,5	46	88	77
		Kastenwagenoptimierung Stufe 2	-0,06	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
		Aktive Systeme	n.v.	n.v.	1,0	8,7	8,0	970	1.186	1.078

Quellen: eigene Darstellung nach [13], [17]–[19], [25], [31], [101], [206], [207]

Tabelle E.5: Leichtbaupotentiale und Kosten je Fahrzeugsegment

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Leichtbaupotential in kg						Kosten in EUR ₂₀₁₀					
			Fahrzeugsegment						Fahrzeugsegment					
			3,5t zGG	7,5t zGG	12t zGG	18t zGG	26t zGG	40t zGG	3,5t zGG	7,5t zGG	12t zGG	18t zGG	26t zGG	40t zGG
Leichtbau	Antriebsstrang	Werkstoffleichtbau	33						178					
			57	62	86	152	162	218	2.132	2.139	2.967	5.244	5.589	8.698
	Elektrik & Elektronik	Fromleichtbau						10						63
	Fahrwerk	Werkstoff-, From-, und Konzeptleichtbau	34	236	330	583	622	924	184	1.227	1.716	3.032	3.234	5.821
			134	429	600	1.060	1.131	1.522	5.012	14.801	20.700	36.570	39.020	60.728
	Karosserie/ Kabine & Aufbau bzw. Auflieger	Werkstoff-, From-, und Konzeptleichtbau	56	215	301	531	567	283	123	280	391	690	737	368
			155	496	693	1.223	1.305	1.266	837	2.579	3.604	6.360	6.786	7.976
			290	714	1.000	1.763	1.882	2.506	10.846	24.633	34.500	60.824	64.929	99.989
	Sonstiges	Konzeptleichtbau						64						403

Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [103]**Tabelle E.6:** Überblick von Technologien bzw. Maßnahmen bzgl. Reifen und Räder inklusive der Bandbreiten angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Δm	Reduktionspotential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
				Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Reifen und Räder	Rollwiderstandsbeiwert	Optimierte Reifen	-	1,0	12,0	2,9	8	342	184
		Einzel-Breitreifen	-120 kg	2,0	10,0	4,0	346	1.233	794
		Druckausgleichsystem	n.v.	0,6	8,0	3,0	269	13.227	11.503
		Optimierte Einzel-Breitreifen	-120 kg	2,1	12,0	10,5	346	346	346

Quellen: eigene Darstellung nach [13], [18], [19], [21], [22], [25], [31], [205], [207]

Tabelle E.7: Überblick sonstiger Maßnahmen bzw. Technologien inklusive der Bandbreiten angegebener Verbrauchsreduktionspotentiale und Kosten

	Kategorie	Technologie bzw. Maßnahme	Reduktionspotential in %			Kosten in EUR ₂₀₁₀		
			Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
sonstige Maßnahmen	Intelligente Transportsysteme	Adaptive Cruise Control (ACC)	1,0	10,0	5,5	828	2.259	1.739
		Predictive Cruise Control (PCC)	1,0	5,0	2,0	74	1.328	649
		Platooning	3,0	21,0	17,5	362	1.958	1.366
		Autonomes Fahren	15,0	21,0	17,5	n.v.	n.v.	n.v.
		PCC für Hybridfahrzeuge	3,0	9,0	6,0	649	1.175	912
		Echtzeit Verkehrsinformationen und ACC	5,0	7,0	6,0	n.v.	n.v.	n.v.
		Routenoptimierung inkl. Software	1,0	10,0	1,0	461	7.528	3.995
	Fahrer	Fahrschulung	1,0	10,0	5,5	178	615	356
		Anzeigeeinstrumente mit Eco-Indikatoren	1,0	10,0	5,0	n.v.	n.v.	n.v.

Quellen: eigene Darstellung in Anlehnung an [13], [15], [17]–[19], [25], [208]–[210]

F. Technologieportfolio je Fahrzeugsegment

Tabelle F.1: Technologieportfolio – Segment 3,5t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit und effizientere Aufladung: -1% (UTL, OTL), -1.5% (HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	300
	Diesel#2	Motor: Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	500
	Diesel#3	Motor: ATL-verbesserte Effizienz, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2020)	600
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Zündverzugszeit, ATL-verbesserte Effizienz, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, Verzicht auf AGR (SCR-only), Erhöhung des Einspritzdrucks, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	750
	Diesel#5	Motor: Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), effizientere Aufladung, Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	550
	Diesel#6	Motor: Verringerung der Zündverzugszeit, Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, Verzicht auf AGR (SCR-only), Erhöhung des Einspritzdrucks, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,25%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz	2 (2020)	900
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; Niedertemperatur-Verbrennung: 12% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2030)	1.200
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -3,5%; OTL: -1,5%; HL: -2,5%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	300
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -4,5%; OTL: -3,5%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2020)	500

Tabelle F.2: Technologieportfolio – Segment 3,5t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimiertes Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -3,5%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	600
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2020)	900
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -9,5%; OTL: -6,5%; HL: -3,75%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2020)	1.000
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -12% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2030)	1.200
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.3: Technologieportfolio – Segment 3,5t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Kastenwagenoptimierung	Δc_w : -0,04	2 (2020)	80
	Kastenwagenoptimierung	Δc_w : -0,06	3 (2030)	110
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -56 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	122
	Leichtbaupaket#2	Δm : -222 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminum, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2020)	1.199
	Leichtbaupaket#3	Δm : -481 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2030)	17.989
	Leichtbaupaket#4	Δm : -56 kg (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	122
	Leichtbaupaket#5	Δm : -56 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2020)	122
	Leichtbaupaket#6	Δm : -56 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2030)	122
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 7,5‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	50
	optimierte Reifen#2	f_R : 6,5‰ - Effizienzklasse A	2 (2020)	85

Tabelle F.4: Technologieportfolio – Segment 7,5t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit : 1% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.170
	Diesel#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -1,5%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.347
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -1,25%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.615
	Diesel#5	Motor: ATL-mit verbesserter Effizienz, Verringerung der Zündverzugszeit und Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, verzicht auf AGR: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.716
	Diesel#6	Motor: Basis Motorpaket 5; 1,5% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL): UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.116
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; 15% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	3.366
	Diesel#8	Motor: Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -9,5%; OTL: -5,5%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.765
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -2,5%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	277
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -5,5%; OTL: -4,5%; HL: -5%; VL: -5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	1.777

Tabelle F.5: Technologieportfolio – Segment 7,5t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimierte Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -5%; OTL: -3%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.534
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10%; OTL: -7%; HL: -4,25%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.313
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.413
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -13% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.663
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.6: Technologieportfolio – Segment 7,5t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	$\Delta c_{w,0}$: -0,04; Δm : +200 kg	1 (2015)	4.250
	Heckeinzug#2	$\Delta c_{w,0}$: -0,03 (Aufbau); Δm : +50 kg	1 (2015)	871
	Kameras#3	$\Delta c_{w,0}$: -0,02 (Fahrerhaus); Δm : vernachlässigbar	2 (2025)	4.900
	Unterbodenvollverkleidung#4	$\Delta c_{w,0}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.500
	Fahrgestellabdeckung#5	$\Delta c_{w,0}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	$\Delta c_{w,0}$: -0,04 (Aufbau); Δm : n.V.	2 (2025)	1.345
	Umlenkschaukeln#7	$\Delta c_{w,0}$: -0,02 (Aufbau); Δm : n.V.	1 (2015)	700
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -215 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	409
	Leichtbaupaket#2	Δm : -732 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2025)	3.806
	Leichtbaupaket#3	Δm : -1.205 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2035)	41.586
	Leichtbaupaket#4	Δm : -215 kg (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	409
	Leichtbaupaket#5	Δm : -215 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2025)	409
	Leichtbaupaket#6	Δm : -215 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2035)	409
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 6,35‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	100
	optimierte Reifen#2	f_R : 5,35‰ - Effizienzklasse A	2 (2025)	200
Sonstiges	Autonomiestufen#1	Fahrerassistenz: Adaptive Cruise Control (ACC), Lane keep assist, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	1.739
	Autonomiestufe#2	Teilautomation: Predictive powertrain Control, Lane change assist incl. right-turning, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	6.666
	Autonomiestufe#3	bedingte Automation: Platooning, Real time communication between trucks via V2V; Fahrer antwortet auf Anfrage	2 (2025)	12.657
	Autonomiestufen#4	hohe Automation: Highway pilot; Keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus	2 (2025)	18.357
	Autonomiestufe#5	volle Automation: Truck pilot; Keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich	3 (2035)	22.608
	Fahrerschulung	dreimal pro Jahr	1 (2015)	1.269

Tabelle F.7: Technologieportfolio – Segment 12t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit : 1% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.170
	Diesel#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -1,5%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.347
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -1,25%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.615
	Diesel#5	Motor: ATL-mit verbesserter Effizienz, Verringerung der Zündverzugszeit und Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, verzicht auf AGR: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.716
	Diesel#6	Motor: Basis Motorpaket 5; 1,5% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL): UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.116
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; 15% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	3.366
	Diesel#8	Motor: Downsizing durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -9,5%; OTL: -5,5%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.765
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -2,5%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	277
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -5,5%; OTL: -4,5%; HL: -5%; VL: -5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	1.777

Tabelle F.8: Technologieportfolio – Segment 12t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimierte Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -5%; OTL: -3%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.534
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10%; OTL: -7%; HL: -4,25%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.313
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.413
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -13% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.663
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.9: Technologieportfolio – Segment 12t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	Δc_w : -0,04; Δm : +200 kg	1 (2015)	4.250
	Heckeinzug#2	Δc_w : -0,03 (Aufbau); Δm : +50 kg	1 (2015)	871
	Kameras#3	Δc_w : -0,02 (Fahrerhaus); Δm : vernachlässigbar	2 (2025)	4.900
	Unterbodenvollverkleidung#4	Δc_w : -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.500
	Fahrgestellabdeckung#5	Δc_w : -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	Δc_w : -0,04 (Aufbau); Δm : n.V.	2 (2025)	1.345
	Umlenkschaukeln#7	Δc_w : -0,02 (Aufbau); Δm : n.V.	1 (2015)	700
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -301 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	572
	Leichtbaupaket#2	Δm : -1.023 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2025)	5.322
	Leichtbaupaket#3	Δm : -301 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2035)	58.153
	Leichtbaupaket#4	Δm : -301 kg (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	572
	Leichtbaupaket#5	Δm : -301 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2025)	572
	Leichtbaupaket#6	Δm : -301 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2035)	572
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 6,35‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	100
	optimierte Reifen#2	f_R : 5,35‰ - Effizienzklasse A	2 (2025)	200
Sonstiges	Autonomiestufe#1	Fahrerassistenz: Adaptive Cruise Control (ACC), Lane keep assist, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	1.739
	Autonomiestufe#2	Teilautomation: Predictive powertrain Control, Lane change assist incl. right-turning, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	6.666
	Autonomiestufe#3	bedingte Automation: Platooning, Real time communication between trucks via V2V; Fahrer antwortet auf Anfrage	2 (2025)	12.657
	Autonomiestufe#4	hohe Automation: Highway pilot; Keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus	2 (2025)	18.357
	Autonomiestufe#5	volle Automation: Truck pilot; Keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich	3 (2035)	22.608
	Fahrerschulung	dreimal pro Jahr	1 (2015)	1.269

Tabelle F.10: Technologieportfolio – Segment 18t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit : 1% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.170
	Diesel#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -1,5%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.347
	Diesel#3	Motor: Basis Motorpaket 2 und ORC. ORC aber nur relevant bei Zyklen mit hohem stationären Anteil z.B. Konstantfahrt auf der Autobahn in hohem Lastbereich: VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	11.958
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -1,25%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.615
	Diesel#5	Motor: ATL-mit verbesserter Effizienz, Verringerung der Zündverzugszeit und Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, verzicht auf AGR: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.716
	Diesel#6	Motor: Basis Motorpaket 5; 1,5% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL): UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.116
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; 15% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	3.366
	Diesel#8	Motor: Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -9,5%; OTL: -5,5%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.765
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -2,5%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	277
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -5,5%; OTL: -4,5%; HL: -5%; VL: -5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	1.777

Tabelle F.11: Technologieportfolio – Segment 18t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimierte Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -5%; OTL: -3%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.534
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10%; OTL: -7%; HL: -4,25%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.313
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.413
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -13% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.663
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.12: Technologieportfolio – Segment 18t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	$\Delta c_{w'}$: -0,04; Δm : +200 kg	1 (2015)	4.250
	Heckeinzug#2	$\Delta c_{w'}$: -0,03 (Aufbau); Δm : +50 kg	1 (2015)	871
	Kameras#3	$\Delta c_{w'}$: -0,02 (Fahrerhaus); Δm : vernachlässigbar	2 (2025)	4.900
	Unterbodenvollverkleidung#4	$\Delta c_{w'}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.500
	Fahrgestellabdeckung#5	$\Delta c_{w'}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	$\Delta c_{w'}$: -0,04 (Aufbau); Δm : n.V.	2 (2025)	1.345
	Umlenkschaukeln#7	$\Delta c_{w'}$: -0,02 (Aufbau); Δm : n.V.	1 (2015)	700
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -531 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	1.009
	Leichtbaupaket#2	Δm : -1.806 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2025)	9.393
	Leichtbaupaket#3	Δm : -2.975 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2035)	102.638
	Leichtbaupaket#4	Δm : -531 kg (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	1.009
	Leichtbaupaket#5	Δm : -531 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2025)	1.009
	Leichtbaupaket#6	Δm : -531 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2035)	1.009
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 5‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	100
	optimierte Reifen#2	f_R : 4‰ - Effizienzklasse A	2 (2025)	200
Sonstiges	Autonomiestufe#1	Fahrerassistenz: Adaptive Cruise Control (ACC), Lane keep assist, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	1.739
	Autonomiestufe#2	Teilautomation: Predictive powertrain Control, Lane change assist incl. right-turning, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	6.666
	Autonomiestufe#3	bedingte Automation: Platooning, Real time communication between trucks via V2V; Fahrer antwortet auf Anfrage	2 (2025)	12.657
	Autonomiestufe#4	hohe Automation: Highway pilot; Keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus	2 (2025)	18.357
	Autonomiestufe#5	volle Automation: Truck pilot; Keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich	3 (2035)	22.608
	Fahrerschulung	dreimal pro Jahr	1 (2015)	1.269

Tabelle F.13: Technologieportfolio – Segment 26t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit : 1% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.170
	Diesel#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -1,5%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.347
	Diesel#3	Motor: Basis Motorpaket 2 und ORC. ORC aber nur relevant bei Zyklen mit hohem stationären Anteil z.B. Konstantfahrt auf der Autobahn in hohem Lastbereich: VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	11.958
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -1,25%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.615
	Diesel#5	Motor: ATL-mit verbesserter Effizienz, Verringerung der Zündverzugszeit und Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, verzicht auf AGR: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.716
	Diesel#6	Motor: Basis Motorpaket 5; 1,5% Verbesserung über das Gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL): UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.116
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; 15% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	3.366
	Diesel#8	Motor: Downsampling durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -9,5%; OTL: -5,5%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.765
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -2,5%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	277
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -5,5%; OTL: -4,5%; HL: -5%; VL: -5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	1.777

Tabelle F.14: Technologieportfolio – Segment 26t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimiertes Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -5%; OTL: -3%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.534
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10%; OTL: -7%; HL: -4,25%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.313
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.413
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -13% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.663
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.15: Technologieportfolio – Segment 26t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	Δc_w : -0,04; Δm : +200 kg	1 (2015)	4.250
	Heckeinzug#2	Δc_w : -0,03 (Aufbau); Δm : +50 kg	1 (2015)	871
	Kameras#3	Δc_w : -0,02 (Fahrerhaus); Δm : vernachlässigbar	2 (2025)	4.900
	Unterbodenvollverkleidung#4	Δc_w : -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.500
	Fahrgestellabdeckung#5	Δc_w : -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	Δc_w : -0,04 (Aufbau); Δm : n.V.	2 (2025)	1.345
	Umlenkschaukeln#7	Δc_w : -0,02 (Aufbau); Δm : n.V.	1 (2015)	700
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -567 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	1.077
	Leichtbaupaket#2	Δm : -1.927 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2025)	10.022
	Leichtbaupaket#3	Δm : -3.175 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2035)	109.520
	Leichtbaupaket#4	Δm : -567 kg (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	1.077
	Leichtbaupaket#5	Δm : -567 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0,110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2025)	1.077
	Leichtbaupaket#6	Δm : -567 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0,126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2035)	1.077
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 5‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	100
	optimierte Reifen#2	f_R : 4‰ - Effizienzklasse A	2 (2025)	200
Sonstiges	Autonomiestufe#1	Fahrassistent: Adaptive Cruise Control (ACC), Lane keep assist, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	1.739
	Autonomiestufe#2	Teilautomation: Predictive powertrain Control, Lane change assist incl. right-turning, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	6.666
	Autonomiestufe#3	bedingte Automation: Platooning, Real time communication between trucks via V2V; Fahrer antwortet auf Anfrage	2 (2025)	12.657
	Autonomiestufe#4	hohe Automation: Highway pilot; Keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus	2 (2025)	18.357
	Autonomiestufe#5	volle Automation: Truck pilot; Keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich	3 (2035)	22.608
	Fahrerschulung	dreimal pro Jahr	1 (2015)	1.269

Tabelle F.16: Technologieportfolio – Segment 40t zGG – Teil 1

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Diesel#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit : 1% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.170
	Diesel#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. Verringerung der Zündverzugszeit, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4%; OTL: -2%; HL: -1,5%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.347
	Diesel#3	Motor: Basis Motorpaket 2 und ORC. ORC aber nur relevant bei Zyklen mit hohem stationären Anteil z.B. Konstantfahrt auf der Autobahn in hohem Lastbereich: VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	11.958
	Diesel#4	Motor: Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -8%; OTL: -4%; HL: -1,25%; VL: -1%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.615
	Diesel#5	Motor: ATL-mit verbesserter Effizienz, Verringerung der Zündverzugszeit und Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld, verzicht auf AGR: UTL: -9%; OTL: -6%; HL: -3,25%; VL: -2,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.716
	Diesel#6	Motor: Basis Motorpaket 5; 1,5% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL): UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.116
	Diesel#7	Motor: Basis Motorpaket 1; 15% Verbesserung über das gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL); Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	3.366
	Diesel#8	Motor: Downsheading durch optimiertes Aufladungskonzept (R2S), Verringerung der Zündverzugszeit, Verringerung der Reibungsverluste über das gesamte Motorkennfeld: UTL: -9,5%; OTL: -5,5%; HL: -3%; VL: -3%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	2.765
	Erdgas#1	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung und eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -4,5%; OTL: -2,5%; HL: -3,5%; VL: -3,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	277
	Erdgas#2	Motor: Optimierung des Verbrennungsprozesses durch z.B. effizientere Aufladung, eingeschränkte Reibungsreduktion und variable Verdichtung: UTL: -5,5%; OTL: -4,5%; HL: -5%; VL: -5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	1.777

Tabelle F.17: Technologieportfolio – Segment 40t zGG – Teil 2

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Antriebsstrang	Erdgas#3	Motor: Optimiertes Aufladungskonzept (R2S), variable Ventilsteuerung, eingeschränkte Reibungsreduktion: UTL: -5%; OTL: -3%; HL: -4%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	1 (2015)	1.534
	Erdgas#4	Motor: Zweistufige ATL, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10%; OTL: -7%; HL: -4,25%; VL: -4%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.313
	Erdgas#5	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt: UTL: -10,5%; OTL: -7,5%; HL: -4,75%; VL: -4,5%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.413
	Erdgas#6	Motor: Zweistufige ATL mit verbesserter Effizienz, Reibungsreduktion über das gesamte Kennfeld, AGR, Variable Ventilsteuerung, Magerkonzept-Strahlgeführt, Closed-loop Motorsteuerung & -regelung: -13% Verbesserung über das Gesamte Kennfeld (UTL, OTL, HL, VL) im Vergleich zur Basis; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	3.663
	PHEV-CD#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	PHEV-CD#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	BEV/REEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 95%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	BEV/REEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Lastbereich 1: 94% auf 97%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral
	FCEV#1	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +2%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 93%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 55%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	2 (2025)	kostenneutral
	FCEV#2	EM: Verbesserte Effizienz durch z.B. den Einsatz neuer Materialien: Ø Wirkungsgrad +3%; LE: Verbesserte Effizienz: 97% auf 98%; BAT: Steigerung des Wirkungsgrades: 90% auf 95%; BZS: Erhöhung des realen Systemwirkungsgrades: 51% auf 60%; Getriebe: Erhöhung des Übertragungswirkungsgrades: 94% auf 95%; Endantrieb: Schmiermittelloptimierung: verbesserte Übertragungseffizienz von 95% auf 96%	3 (2035)	kostenneutral

Tabelle F.18: Technologieportfolio – Segment 40t zGG – Teil 3

Kategorie	Technologieelement	technische Charakterisierung und Anmerkungen	Evolutionsstufe	Herstellungskosten in EUR ₂₀₁₀
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	$\Delta c_{w,-}$: -0,04 (Auflieger); Δm : +200 kg	1 (2015)	4.250
	Heckeinzug#2	$\Delta c_{w,-}$: -0,03 (Auflieger); Δm : +50 kg	1 (2015)	871
	Kameras#3	$\Delta c_{w,-}$: -0,02 (Fahrerhaus); Δm : vernachlässigbar	2 (2025)	4.900
	Unterbodenvollverkleidung#4	$\Delta c_{w,-}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.500
	Fahrgestellabdeckung#5	$\Delta c_{w,-}$: -0,02 (Fahrwerk); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	$\Delta c_{w,-}$: -0,04 (Auflieger); Δm : n.V.	2 (2025)	1.345
	Umlenkschaukeln#7	$\Delta c_{w,-}$: -0,02 (Auflieger); Δm : n.V.	1 (2015)	700
	Trennplatte#8	$\Delta c_{w,-}$: -0,04 (Fahrerhaus/ Auflieger); Δm : n.V.	1 (2015)	2.000
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	Δm : -283 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	368
	Leichtbaupaket#2	Δm : -2.264 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; vermehrte Verwendung von Aluminium, Glas- und Kohlefaserverbundwerkstoffen	2 (2025)	14.265
	Leichtbaupaket#3	Δm : -4.246 kg (bzgl. allen Fahrzeugarchitekturen außer PHEV/BEV/REEV); Werkstoffpreise zum Jahr 2015; Fahrgestell, Karosseriestruktur und andere Komponententeile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff	3 (2035)	169.399
	Leichtbaupaket#4	Δm : -283 kg (nur bzgl. PHEV, BEV, REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität	1 (2015)	386
	Leichtbaupaket#5	Δm : -283 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.110 kWh/kg - Li-Ion 2. Generation)	2 (2025)	386
	Leichtbaupaket#6	Δm : -283 kg zzgl. konfigurationsabhängige Gewichtsreduktion der BAT (nur bzgl. PHEV/BEV/REEV Fahrzeugarchitektur); verbessertes Komponenten-Design, Erhöhung der Stahlqualität; kostenneutrale Steigerung der grav. Leistungsdichte der BAT (0,091 kWh/kg --> 0.126 kWh/kg - Li-Ion 3. Generation)	3 (2035)	386
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	f_R : 5‰ - Effizienzklasse B	1 (2015)	100
	optimierte Reifen#2	f_R : 4‰ - Effizienzklasse A	2 (2025)	200
Sonstiges	Autonomiestufe#1	Fahrerassistenz: Adaptive Cruise Control (ACC), Lane keep assist, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	1.739
	Autonomiestufe#2	Teilautomation: Predictive powertrain Control, Lane change assist incl. right-turning, etc.; Fahrer voll beschäftigt	1 (2015)	6.666
	Autonomiestufe#3	bedingte Automation: Platooning, Real time communication between trucks via V2V; Fahrer antwortet auf Anfrage	2 (2025)	12.657
	Autonomiestufe#4	hohe Automation: Highway pilot; Keine Fahraktivität des Fahrers während des automatisierten Fahrmodus	2 (2025)	18.357
	Autonomiestufe#5	volle Automation: Truck pilot; Keine Fahraktivitäten des Fahrers bzw. kein Fahrer erforderlich	3 (2035)	22.608
	Fahrerschulung	dreimal pro Jahr	1 (2015)	1.269

G. Streckenverbrauchsreduktionspotentiale des Technologieportfolios je Fahrzeugsegment

Tabelle G.1: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 3,5t zGG

Kategorie	Technologieelement	NEFZ_Gesamt	WLTP_Gesamt	WLTP_urban	WLTP_regional	WLTP_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	2,9%	3,1%	2,8%	3,2%	3,2%
	Diesel#2	4,5%	4,2%	3,9%	4,3%	4,2%
	Diesel#3	6,9%	6,1%	6,0%	6,3%	5,9%
	Diesel#4	8,4%	8,0%	7,6%	8,1%	7,9%
	Diesel#5	4,5%	4,3%	3,9%	4,4%	4,3%
	Diesel#6	9,5%	9,1%	8,6%	9,3%	9,0%
	Diesel#7	12,8%	13,4%	12,0%	13,5%	13,8%
Aerodynamik	Kastenwagenoptimierung#1	2,7%	4,2%	0,6%	2,9%	6,6%
	Kastenwagenoptimierung#2	4,4%	6,2%	0,9%	4,4%	9,8%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	1,2%	1,0%	1,8%	1,3%	0,6%
	Leichtbaupaket#2	4,7%	4,9%	7,1%	5,8%	3,3%
	Leichtbaupaket#3	9,7%	10,6%	14,9%	12,5%	7,2%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	2,5%	2,0%	1,8%	2,4%	1,7%
	optimierte Reifen#2	5,0%	3,7%	3,3%	4,2%	3,4%

Tabelle G.2: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 7,5t zGG

Kategorie	Technologieelement	WHVC_urban	WHVC_regional	WHVC_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	2,80%	2,96%	2,98%
	Diesel#2	3,75%	3,79%	3,86%
	Diesel#4	5,28%	5,06%	5,79%
	Diesel#5	6,88%	6,81%	7,56%
	Diesel#6	8,20%	8,19%	8,92%
	Diesel#7	15,79%	16,60%	16,77%
	Diesel#8	6,55%	6,42%	7,14%
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	0,00%	0,00%	4,42%
	Heckenzug#2	0,00%	1,08%	3,97%
	Kameras#3	0,50%	1,01%	2,75%
	Unterbodenvollverkleidung#4	0,50%	1,01%	2,75%
	Fahrgestellabdeckung#5	0,50%	1,01%	2,75%
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	0,98%	2,22%	5,56%
	Umlenkschaukeln#7	0,50%	1,01%	2,75%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	2,81%	2,54%	1,10%
	Leichtbaupaket#2	9,45%	8,68%	4,02%
	Leichtbaupaket#3	15,36%	14,05%	6,71%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	2,62%	3,02%	3,54%
	optimierte Reifen#2	4,98%	5,89%	7,16%
Sonstiges	Autonomiestufe#1	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#2	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#3	15,00%	15,00%	15,00%
	Autonomiestufe#4	17,50%	17,50%	17,50%
	Autonomiestufe#5	17,50%	17,50%	17,50%
	Fahrerschulung	5,00%	5,00%	5,00%

Tabelle G.3: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 12t zGG

Kategorie	Technologieelement	WHVC_Gesamt	WHVC_urban	WHVC_regional	WHVC_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	2,96%	2,89%	2,99%	2,98%
	Diesel#2	3,74%	3,66%	3,69%	3,83%
	Diesel#4	5,01%	4,71%	4,45%	5,61%
	Diesel#5	6,78%	6,42%	6,25%	7,39%
	Diesel#6	8,15%	7,78%	7,66%	8,75%
	Diesel#7	16,58%	16,20%	16,70%	16,78%
	Diesel#8	6,38%	6,06%	5,84%	6,97%
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	1,16%	0,00%	0,00%	3,65%
	Heckenzug#2	1,59%	0,15%	0,76%	3,19%
	Kameras#3	1,26%	0,29%	0,73%	2,31%
	Unterbodenvollverkleidung#4	1,26%	0,29%	0,73%	2,31%
	Fahrgestellabdeckung#5	1,26%	0,29%	0,73%	2,31%
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	2,51%	0,63%	1,52%	4,56%
Leichtbau	Umlenkschaukeln#7	1,26%	0,29%	0,73%	2,31%
	Leichtbaupaket#1	2,03%	2,45%	2,54%	1,38%
	Leichtbaupaket#2	6,96%	8,99%	8,42%	4,50%
	Leichtbaupaket#3	11,28%	14,80%	13,48%	7,23%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	3,16%	2,34%	2,81%	3,99%
	optimierte Reifen#2	6,23%	4,60%	5,53%	7,90%
Sonstiges	Autonomiestufe#1	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#2	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#3	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
	Autonomiestufe#4	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Autonomiestufe#5	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Fahrschulung	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

Tabelle G.4: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 18t zGG

Kategorie	Technologieelement	WHVC_Gesamt	WHVC_urban	WHVC_regional	WHVC_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	2,96%	2,93%	2,99%	2,97%
	Diesel#2	3,86%	3,78%	3,73%	4,02%
	Diesel#3	3,91%	3,78%	3,88%	4,05%
	Diesel#4	5,35%	5,09%	4,75%	6,03%
	Diesel#5	7,08%	6,82%	6,53%	7,73%
	Diesel#6	8,46%	8,18%	7,93%	9,11%
	Diesel#7	16,66%	16,44%	16,73%	16,79%
	Diesel#8	6,71%	6,43%	6,16%	7,37%
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	0,83%	0,00%	0,00%	2,96%
	Heckenzug#2	1,13%	0,00%	0,43%	2,68%
	Kameras#3	0,90%	0,18%	0,41%	1,89%
	Unterbodenvollverkleidung#4	0,90%	0,18%	0,41%	1,89%
	Fahrgestellabdeckung#5	0,90%	0,18%	0,41%	1,89%
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	1,78%	0,37%	1,00%	3,62%
	Umlenkschaukeln#7	0,90%	0,18%	0,41%	1,89%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	2,61%	3,44%	2,88%	1,68%
	Leichtbaupaket#2	8,70%	11,33%	9,56%	5,76%
	Leichtbaupaket#3	14,21%	18,22%	16,26%	9,14%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	3,17%	2,23%	2,75%	4,31%
	optimierte Reifen#2	6,30%	4,77%	5,10%	8,55%
Sonstiges	Autonomiestufe#1	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#2	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#3	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
	Autonomiestufe#4	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Autonomiestufe#5	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Fahrschulung	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

Tabelle G.5: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 26t zGG

Kategorie	Technologieelement	WHVC_urban	WHVC_regional	WHVC_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	2,94%	3,00%	3,00%
	Diesel#2	3,77%	3,67%	3,76%
	Diesel#3	3,77%	3,70%	3,83%
	Diesel#4	5,04%	4,43%	5,04%
	Diesel#5	6,79%	6,26%	6,84%
	Diesel#6	8,16%	7,66%	8,23%
	Diesel#7	16,51%	16,77%	16,81%
	Diesel#8	6,39%	5,82%	6,43%
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	0,00%	0,07%	2,64%
	Heckeinzug#2	0,00%	0,50%	2,31%
	Kameras#3	0,18%	0,44%	1,59%
	Unterbodenvollverkleidung#4	0,18%	0,44%	1,59%
	Fahrgestellabdeckung#5	0,18%	0,44%	1,59%
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	0,32%	0,82%	3,17%
	Umlenkschaukeln#7	0,18%	0,44%	1,59%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	2,82%	2,07%	1,36%
	Leichtbaupaket#2	8,91%	8,08%	4,71%
	Leichtbaupaket#3	14,51%	13,35%	7,75%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	2,68%	2,68%	5,23%
	optimierte Reifen#2	5,30%	5,82%	10,26%
Sonstiges	Autonomiestufe#1	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#2	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#3	15,00%	15,00%	15,00%
	Autonomiestufe#4	17,50%	17,50%	17,50%
	Autonomiestufe#5	17,50%	17,50%	17,50%
	Fahrerschulung	5,00%	5,00%	5,00%

Tabelle G.6: Streckenverbrauchsreduktionspotentiale für das ICE-D Basis-Fahrzeugkonzept des Segments 40t zGG

Kategorie	Technologieelement	WHVC_Gesamt	WHVC_urban	WHVC_regional	WHVC_Autobahn
Antriebsstrang	Diesel#1	3,00%	2,97%	3,03%	3,01%
	Diesel#2	3,64%	3,68%	3,55%	3,70%
	Diesel#3	3,89%	3,68%	4,10%	3,93%
	Diesel#4	4,41%	4,50%	4,04%	4,66%
	Diesel#5	6,21%	6,31%	5,83%	6,46%
	Diesel#6	7,62%	7,70%	7,26%	7,87%
	Diesel#7	16,73%	16,64%	16,75%	16,81%
	Diesel#8	5,85%	5,88%	5,56%	6,10%
Aerodynamik	Seitenverkleidung#1	0,80%	0,00%	0,29%	2,49%
	Heckeinzug#2	0,62%	0,04%	0,28%	1,58%
	Kameras#3	0,54%	0,11%	0,29%	1,24%
	Unterbodenvollverkleidung#4	0,54%	0,11%	0,29%	1,24%
	Fahrgestellabdeckung#5	0,54%	0,11%	0,29%	1,24%
	Heck-Vollverkleidung (Boat-tail)#6	1,03%	0,24%	0,66%	2,24%
	Umlenkschaufeln#7	0,54%	0,11%	0,29%	1,24%
	Trennplatte#8	1,03%	0,24%	0,66%	2,24%
Leichtbau	Leichtbaupaket#1	0,65%	0,71%	0,78%	0,46%
	Leichtbaupaket#2	5,63%	6,61%	5,79%	4,41%
	Leichtbaupaket#3	10,29%	11,94%	11,15%	7,71%
Reifen und Räder	optimierte Reifen#1	3,85%	2,53%	3,18%	5,91%
	optimierte Reifen#2	7,58%	5,10%	5,62%	12,10%
Sonstiges	Autonomiestufe#1	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#2	5,50%	5,50%	5,50%	5,50%
	Autonomiestufe#3	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
	Autonomiestufe#4	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Autonomiestufe#5	17,50%	17,50%	17,50%	17,50%
	Fahrerschulung	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

H. Übersicht der Fahrzeugcharakteristika je Fahrzeugsegment

Tabelle H.1: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 3,5t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-NG	MHEV-NG	FHEV-NG	PHEV-NG	REEV-NG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	103	103	103	103	50	103	103	103	103	50	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335	335
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	80	80	80	80	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	40	40	40	40	20	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (700bar)	kg _{700bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,6	1,8
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77	12
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	20	40	103	103	-	20	40	103	103	103	103	103	103
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	50	-	-	-	-	50	-	-	-	50
nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	1	2	10	65	-	1	2	10	65	65	130	1	65
Querschnittsfläche A	m ²	3,50													
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,37													
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	8,50													
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,35													
Drehmassenfaktor e	-	1,08	1,08	1,08	1,08	1,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	3,90	3,90	3,90	3,90	1,00	3,90	3,90	3,90	3,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	6,73	6,73	6,73	6,73	5,50	6,73	6,73	6,73	6,73	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
iGang2	-	3,95	3,95	3,95	3,95	-	3,95	3,95	3,95	3,95	-	-	-	-	-
iGang3	-	2,56	2,56	2,56	2,56	-	2,56	2,56	2,56	2,56	-	-	-	-	-
iGang4	-	1,78	1,78	1,78	1,78	-	1,78	1,78	1,78	1,78	-	-	-	-	-
iGang5	-	1,29	1,29	1,29	1,29	-	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-
iGang6	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-

Tabelle H.2: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 7,5t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-CNG	MHEV-CNG	FHEV-CNG	PHEV-CNG	REEV-CNG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	135	135	135	135	50	135	135	135	135	50	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	120	120	120	120	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	60	60	60	60	30	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (350bar)	kg _{350bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,0	3,0
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101	15
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	40	80	135	135	-	40	80	135	135	135	135	135	135
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	50	-	-	-	-	50	-	-	-	50
Nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	3	5	20	90	-	3	5	20	90	90	180	3	90
Querschnittsfläche A	m ²	7,00													
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,45													
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	7,35													
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,37													
Drehmassenfaktor e	-	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	3,42	3,42	3,42	3,42	1,00	3,42	3,42	3,42	3,42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	6,02	6,02	6,02	6,02	5,35	6,02	6,02	6,02	6,02	5,35	5,35	5,35	5,35	5,35
iGang2	-	3,32	3,32	3,32	3,32	-	3,32	3,32	3,32	3,32	-	-	-	-	-
iGang3	-	2,07	2,07	2,07	2,07	-	2,07	2,07	2,07	2,07	-	-	-	-	-
iGang4	-	1,40	1,40	1,40	1,40	-	1,40	1,40	1,40	1,40	-	-	-	-	-
iGang5	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-
iGang6	-	0,79	0,79	0,79	0,79	-	0,79	0,79	0,79	0,79	-	-	-	-	-

Tabelle H.3: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 12t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-CNG	MHEV-CNG	FHEV-CNG	PHEV-CNG	REEV-CNG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	169	169	169	169	50	169	169	169	169	50	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	120	120	120	120	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	60	60	60	60	30	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (350bar)	kg _{350bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	4,5
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	127	19
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	40	80	169	169	-	40	80	169	169	169	169	169	169
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	50	-	-	-	-	50	-	-	-	50
Nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	3	5	20	150	-	3	5	20	150	150	250	3	150
Querschnittsfläche A	m ²	8,00													
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,50													
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	7,35													
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,41													
Drehmassenfaktor e	-	1,17	1,17	1,17	1,17	1,00	1,17	1,17	1,17	1,17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	4,30	4,30	4,30	4,30	1,00	4,30	4,30	4,30	4,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	9,48	9,48	9,48	9,48	8,50	9,48	9,48	9,48	9,48	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
iGang2	-	6,58	6,58	6,58	6,58	-	6,58	6,58	6,58	6,58	-	-	-	-	-
iGang3	-	4,68	4,68	4,68	4,68	-	4,68	4,68	4,68	4,68	-	-	-	-	-
iGang4	-	3,48	3,48	3,48	3,48	-	3,48	3,48	3,48	3,48	-	-	-	-	-
iGang5	-	2,62	2,62	2,62	2,62	-	2,62	2,62	2,62	2,62	-	-	-	-	-
iGang6	-	1,89	1,89	1,89	1,89	-	1,89	1,89	1,89	1,89	-	-	-	-	-
iGang7	-	1,35	1,35	1,35	1,35	-	1,35	1,35	1,35	1,35	-	-	-	-	-
iGang8	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-
iGang9	-	0,75	0,75	0,75	0,75	-	0,75	0,75	0,75	0,75	-	-	-	-	-

Tabelle H.4: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 18t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-CNG	ICE-LNG	MHEV-CNG	MHEV-LNG	FHEV-CNG	FHEV-LNG	PHEV-CNG	PHEV-LNG	REEV-CNG	REEV-LNG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	210	210	210	210	135	210	210	210	210	210	210	210	210	135	135	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425	1.425
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	310	310	310	310	310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	90	180	90	180	90	180	90	180	45	90	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (350bar)	kg _{350bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,0	6,0
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158	24
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	40	80	210	210	-	-	40	40	80	80	210	210	210	210	210	210	210	210
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	135	-	-	-	-	-	-	-	-	135	135	-	-	-	135
Nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	5	10	20	180	-	-	5	5	10	10	20	20	180	180	180	360	5	180
Querschnittsfläche A	m ²	9,00																		
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,55																		
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	6,00																		
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,49																		
Drehmassenfaktor e	-	1,32	1,32	1,32	1,32	1,00	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	4,30	4,30	4,30	4,30	1,00	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	12,84	12,84	12,84	12,84	9,25	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	12,84	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25
iGang2	-	10,37	10,37	10,37	10,37	-	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	10,37	-	-	-	-	-	-
iGang3	-	8,03	8,03	8,03	8,03	-	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	-	-	-	-	-	-
iGang4	-	6,49	6,49	6,49	6,49	-	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	-	-	-	-	-	-
iGang5	-	5,18	5,18	5,18	5,18	-	5,18	5,18	5,18	5,18	5,18	5,18	5,18	5,18	-	-	-	-	-	-
iGang6	-	4,18	4,18	4,18	4,18	-	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	-	-	-	-	-	-
iGang7	-	3,07	3,07	3,07	3,07	-	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07	-	-	-	-	-	-
iGang8	-	2,48	2,48	2,48	2,48	-	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	-	-	-	-	-	-
iGang9	-	1,92	1,92	1,92	1,92	-	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	-	-	-	-	-	-
iGang10	-	1,55	1,55	1,55	1,55	-	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	-	-	-	-	-	-
iGang11	-	1,24	1,24	1,24	1,24	-	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	-	-	-	-	-	-
iGang12	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-

Tabelle H.5: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 26t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-CNG	ICE-LNG	MHEV-CNG	MHEV-LNG	FHEV-CNG	FHEV-LNG	PHEV-CNG	PHEV-LNG	REEV-CNG	REEV-LNG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	263	263	263	263	135	263	263	263	263	263	263	263	263	135	135	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	400	400	400	400	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	90	180	90	180	90	180	90	180	45	90	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (350bar)	kg _{350bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,0	8,0
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	197	30
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	60	100	263	263	-	-	60	60	100	100	263	263	263	263	263	263	263	263
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	135	-	-	-	-	-	-	-	-	135	135	-	-	-	135
Nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	5	10	20	240	-	-	5	5	10	10	20	20	240	240	240	480	5	240
Querschnittsfläche A	m ²	9,00																		
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,55																		
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	6,00																		
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,49																		
Drehmassenfaktor e	-	1,32	1,32	1,32	1,32	1,00	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	2,53	2,53	2,53	2,53	1,00	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	15,86	15,86	15,86	15,86	9,25	15,86	15,86	15,86	15,86	15,86	15,86	15,86	15,86	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25
iGang2	-	12,33	12,33	12,33	12,33	-	12,33	12,33	12,33	12,33	12,33	12,33	12,33	12,33	-	-	-	-	-	-
iGang3	-	9,57	9,57	9,57	9,57	-	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57	9,57	-	-	-	-	-	-
iGang4	-	7,44	7,44	7,44	7,44	-	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	7,44	-	-	-	-	-	-
iGang5	-	5,87	5,87	5,87	5,87	-	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87	5,87	-	-	-	-	-	-
iGang6	-	4,57	4,57	4,57	4,57	-	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	4,57	-	-	-	-	-	-
iGang7	-	3,47	3,47	3,47	3,47	-	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	-	-	-	-	-	-
iGang8	-	2,70	2,70	2,70	2,70	-	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	-	-	-	-	-	-
iGang9	-	2,10	2,10	2,10	2,10	-	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	-	-	-	-	-	-
iGang10	-	1,63	1,63	1,63	1,63	-	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	-	-	-	-	-	-
iGang11	-	1,29	1,29	1,29	1,29	-	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-	-
iGang12	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-

Tabelle H.6: Fahrzeugcharakteristika – Fahrzeugsegment 40t zGG

		ICE-D	MHEV-D	FHEV-D	PHEV-D	REEV-D	ICE-LNG	MHEV-LNG	FHEV-LNG	PHEV-LNG	REEV-LNG	BEV _{150km}	BEV _{300km}	FCEV	REEV-FC
Max. Leistung VKM	kW _{mech}	335	335	335	335	150	335	335	335	335	150	-	-	-	-
Max. Drehmoment VKM	Nm	2.200	2200	2200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200	2.200
Tankvolumen - Diesel	l _{diesel}	400	400	400	400	200	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tankvolumen - Erdgas (NG)	kg _{NG}	-	-	-	-	-	180	180	180	180	90	-	-	-	-
Tankvolumen - Wasserstoff (350bar)	kg _{350bar}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	34
Nennleistung BZ-System	kW _{el}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	251	38
Nennleistung EM & LE 1 (Motor)	kW _{el}	-	60	120	335	335	-	60	120	335	335	335	335	335	335
Nennleistung EM & LE 2 (Generator)	kW _{el}	-	-	-	-	150	-	-	-	-	150	-	-	-	150
Nutzbarer Energieinhalt der Batterie	kWh	-	5	10	30	350	-	5	10	30	350	350	700	5	350
Querschnittsfläche A	m ²	10,00													
Luftwiderstandsbeiwert c _w	-	0,53													
Rollwiderstandsbeiwert f _r	‰	6,00													
Dynamischer Radhalbmesser	m	0,49													
Drehmassenfaktor e	-	1,15	1,15	1,15	1,15	1,00	1,15	1,15	1,15	1,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iAchse	-	2,53	2,53	2,53	2,53	1,00	2,53	2,53	2,53	2,53	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
iGang1	-	15,86	15,86	15,86	15,86	9,25	15,86	15,86	15,86	15,86	9,25	9,25	9,25	9,25	9,25
iGang2	-	12,33	12,33	12,33	12,33	-	12,33	12,33	12,33	12,33	-	-	-	-	-
iGang3	-	9,57	9,57	9,57	9,57	-	9,57	9,57	9,57	9,57	-	-	-	-	-
iGang4	-	7,44	7,44	7,44	7,44	-	7,44	7,44	7,44	7,44	-	-	-	-	-
iGang5	-	5,87	5,87	5,87	5,87	-	5,87	5,87	5,87	5,87	-	-	-	-	-
iGang6	-	4,57	4,57	4,57	4,57	-	4,57	4,57	4,57	4,57	-	-	-	-	-
iGang7	-	3,47	3,47	3,47	3,47	-	3,47	3,47	3,47	3,47	-	-	-	-	-
iGang8	-	2,70	2,70	2,70	2,70	-	2,70	2,70	2,70	2,70	-	-	-	-	-
iGang9	-	2,10	2,10	2,10	2,10	-	2,10	2,10	2,10	2,10	-	-	-	-	-
iGang10	-	1,63	1,63	1,63	1,63	-	1,63	1,63	1,63	1,63	-	-	-	-	-
iGang11	-	1,29	1,29	1,29	1,29	-	1,29	1,29	1,29	1,29	-	-	-	-	-
iGang12	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-	-	-

I. Übersicht verschiedener Szenarioergebnisse

Tabelle I.1: Szenarioergebnisse bezüglich schweren Nutzfahrzeugen gegliedert nach den Antriebs-technologien: ICE-NG und HEV

SNF: ICE-NG				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	2%	7%	3%	1%	1%
			geregelter Ruck	18%	1%	1%	0%	0%
			freies Spiel	2%	7%	4%	2%	5%
[46]	Fernverkehr, Bauverkehr, Reisebusse, Stadtbusse, Regionaler Verteilerverkehr, Städtischer Verteilerverkehr, Müllverkehr	ohne spezifische Angabe	Basis	<1%	1%	9%	16%	-
			CO ₂ -Politik	0%	4%	5%	5%	-
			Biogas	0%	5%	23%	42%	-
			e-Mobilität	2%	3%	14%	17%	-
			Rezession	0%	2%	5%	6%	-
[43]	schwerer Verteilerverkehr	12t - 32t zGG		9%	16%	13%	11%	9%
	leichter Verteilerverkehr	7,5t -12t zGG		11%	16%	13%	11%	9%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 7,5t zGG	Basis	1%	4%	7%	-	-
		7,5t -12t zGG		7%	24%	47%	-	-
		12t - 26t zGG		4%	8%	14%	-	-
		40t zGG		6%	14%	23%	-	-
[51]	Verteilerverkehr	mittelschwere Lkw	Basis	-	1%	-	-	-
	Langstrecke	schwere Lkw		-	8%	-	-	-
[49]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 12t zGG	Trend	-	-	-	-	3%
		12t+ & Szm	Alternativ	-	-	-	-	5%
			Alternativ	-	-	-	-	65%
SNF: HEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	9%	50%	79%	75%	36%
			geregelter Ruck	4%	9%	6%	6%	4%
			freies Spiel	0%	0%	8%	10%	14%
[46]	Fernverkehr, Bauverkehr, Reisebusse, Stadtbusse, Regionaler Verteilerverkehr, Städtischer Verteilerverkehr, Müllverkehr	ohne spezifische Angabe	Basis	1%	8%	19%	25%	-
			CO ₂ -Politik	1%	10%	26%	28%	-
			Biogas	1%	8%	16%	17%	-
			e-Mobilität	1%	10%	20%	20%	-
			Rezession	1%	9%	24%	34%	-
[43]	schwerer Verteilerverkehr	12t - 32t zGG	Basis	20%	43%	34%	32%	29%
	leichter Verteilerverkehr	7,5t -12t zGG		26%	35%	34%	31%	29%

Tabelle 1.2: Szenarioergebnisse bezüglich schweren Nutzfahrzeugen gegliedert nach den Antriebs-technologien: PEV und FCEV

SNF: PEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	0%	0%	10%	13%	2%
			geregelter Ruck	28%	83%	86%	81%	88%
			freies Spiel	0%	0%	0%	0%	0%
[46]	Fernverkehr, Bauverkehr, Reisebusse, Stadtbusse, Regionaler Verteilerverkehr, Städtischer Verteilerverkehr, Müllverkehr	ohne spezifische Angabe	Basis	0%	<1%	7%	10%	-
			CO ₂ -Politik	0%	2%	11%	25%	-
			Biogas	0%	<1%	5%	7%	-
			e-Mobilität	0%	5%	14%	31%	-
			Rezession	0%	<1%	<1%	<1%	-
[43]	leichter Verteilerverkehr	7,5t -12t zGG	Basis	0%	0%	0%	1%	2%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 7,5t zGG	Basis	9%	27%	54%	-	-
		7,5t -12t zGG		3%	10%	20%	-	-
		12t - 26t zGG		3%	11%	23%	-	-
		40t zGG		0%	0%	<1%	-	-
[51]	Verteilerverkehr	mittelschwere Lkw	Basis	-	19%	-	-	-
	Langstrecke	schwere Lkw		-	2%	-	-	-
[50]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 7,5t zGG	early adotpion	7%	12%	25%	-	-
		7,5t -16t zGG		3%	9%	28%	-	-
		16t zGG		0%	1%	4%	-	-
[50]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 7,5t zGG	late adotpion	3%	8%	20%	-	-
		7,5t -16t zGG		1%	4%	16%	-	-
		16t zGG		0%	0%	1%	-	-
[49]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 12t zGG	Trend	-	-	-	-	5%
			Alternativ	-	-	-	-	17%
SNF: FCEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	0%	0%	0%	0%	29%
			geregelter Ruck	0%	0%	5%	8%	4%
			freies Spiel	0%	0%	0%	0%	0%
[43]	Fernverkehr	40t zGG	Basis	-	1%	9%	21%	24%
	schwerer Verteilerverkehr	12t - 32t zGG		1%	7%	23%	20%	28%
	leichter Verteilerverkehr	7,5t -12t zGG		1%	7%	24%	29%	32%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t - 7,5t zGG	Basis	3%	11%	20%	-	-
		7,5t -12t zGG		0%	1%	2%	-	-
		12t - 26t zGG		0%	0%	0%	-	-
		40t zGG		0%	0%	0%	-	-

Tabelle 1.3: Szenarioergebnisse bezüglich leichten Nutzfahrzeugen gegliedert nach den Antriebstechnologien: ICE-NG, HEV, PEV und FCEV

LNF: ICE-NG				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	3,5t zGG	Trend	0%	0%	0%	0%	0%
			geregelter Ruck	2%	0%	0%	0%	0%
			freies Spiel	0%	1%	1%	3%	3%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Basis	1%	4%	8%	-	-
[49]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Trend	-	-	-	-	3%
			Alternativ	-	-	-	-	5%
LNF: HEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	3,5t zGG	Trend	48%	99%	79%	72%	73%
			geregelter Ruck	47%	98%	71%	52%	24%
			freies Spiel	48%	49%	48%	48%	49%
LNF: PEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	0%	1%	21%	28%	0%
			geregelter Ruck	0%	2%	0%	2%	2%
			freies Spiel	0%	0%	0%	0%	0%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Basis	7%	21%	41%	-	-
[49]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Trend	-	-	-	-	22%
			Alternativ	-	-	-	-	37%
LNF: FCEV				Marktanteile				
Forschungsarbeit	Anwendungsfall	Fahrzeugsegment	Szenario	2020	2025	2030	2035	2040
vorliegende Arbeit	Gütertransport im Nah-, Regional- und Fernbereich	7,5t zGG, 12t zGG, 18t zGG, 26t zGG, 40t zGG	Trend	0%	0%	0%	0%	26%
			geregelter Ruck	0%	0%	28%	44%	72%
			freies Spiel	0%	0%	0%	0%	0%
[47]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Basis	0%	0%	0%	0%	0%
[49]	ohne spezifische Angabe	3,5t zGG	Trend	-	-	-	-	0%
			Alternativ	-	-	-	-	7%